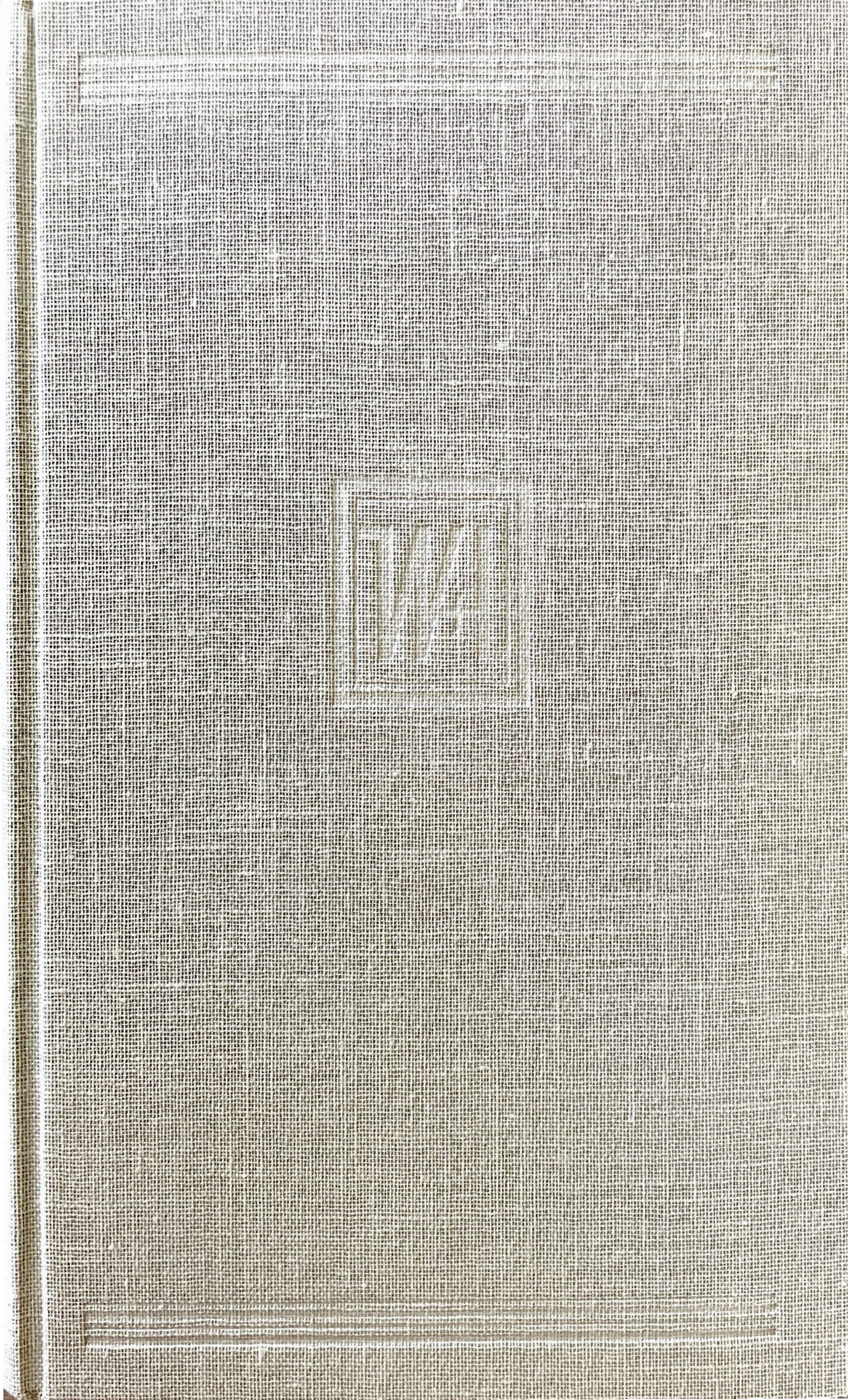



RVA

SAMMLUNG WISSEN UND LEBEN

7

DONALD J. HUGHES

Über die Kernenergie

Die Möglichkeiten ihrer friedlichen Anwendung

Mit einem Geleitwort von Lewis L. Strauss
ehem. Leiter der Atomenergie-Kommission

RHEINISCHE VERLAGS-ANSTALT
WIESBADEN

Titel der Originalausgabe:
ON NUCLEAR ENERGY
im Verlag Harvard University Press, Cambridge/Mass.

Aus dem Amerikanischen übertragen von Dipl.-Ing. Günter Alzmann

 · Printed in Germany
Einband und Umschlag: Joachim Rheinberger
Gesamtherstellung: Gerhard Stalling AG, Oldenburg (Oldb)

GELEITWORT

Dr. Donald J. Hughes vom Brookhaven National Laboratorium ist einer aus dem Kreis begabter Wissenschaftler, die bei der Geburt des Kernzeitalters in den Vereinigten Staaten mithalfen. Während des Zweiten Weltkrieges arbeitete er an der geheimen, für Kriegszwecke bestimmten Entwicklung der Atomenergie. Nach dem Ende des Krieges stellte er sein Talent in den Dienst der wissenschaftlichen Grundlagenforschung über die für das Atom und seine Bestandteile gültigen Gesetze. Er ist wegen seiner langen Verbundenheit mit der Kernwissenschaft besonders geeignet, dieses Buch zu schreiben. Das Ergebnis ist ein Werk mit weitgespanntem Rahmen und fesselnder Darstellung. Die grundsätzlichen Tatsachen der Kernspaltung und Fusion, der Kettenreaktion, der Energiegewinnung aus Kernbrennstoffen und die vielen immer noch zunehmenden Anwendungen der radioaktiven Isotope werden von Dr. Hughes ohne Benützung der Fachsprache genau und klar behandelt. Seine Zusammenfassung von Atomenergieprogrammen der verschiedensten Nationen bietet unter den veröffentlichten einen der vollständigsten und zuverlässigsten Überblicke über dieses Thema. Dr. Hughes hat auch Einblick in so wesentliche Entwicklungen wie das von Präsident Eisenhower ins Leben gerufene Programm der „Atome für den Frieden" und der Internationalen Atomenergie-Behörde, die ein erstes Ergebnis der kühnen Vorstellung des Präsidenten ist. Lesern, die mehr über die Aussichten und Probleme einer Wissenschaft erfahren wollen, die bereits unser aller Leben berührt, wird dieses Buch lohnende Kenntnisse vermitteln.

Lewis L. Strauss

INHALT



VORWORT

Dieses Buch entstand unmittelbar aus den vielen Vorträgen über die Kernenergie in Friedenszeiten, die ich seit 1945, als dieses Thema erstmals auf den Titelblättern der Zeitungen erschien, gehalten habe. In den bis heute vergangenen 12 Jahren hat das starke öffentliche Interesse unvermindert angehalten, und das ist gut so. Die Entwicklung während des Krieges wurde vollständig mit öffentlichen Mitteln finanziert, dies trifft auch für den größten Teil des Nachkriegsprogrammes zu. In Wirklichkeit gehört also den Bürgern der überwiegende Teil des Kernenergiegeschäftes in den Vereinigten Staaten — ein zwei-Milliarden-Dollar-pro-Jahr-Geschäft.

Während der vor den unterschiedlichsten Laiengruppen gehaltenen Vorträge beeindruckte mich stets der wirkliche Eifer der Zuhörer, einiges über die Kernenergie zu erfahren und ihre Bereitschaft, für diesen Zweck einige Stunden konzentrierter Anstrengung in Kauf zu nehmen. Sie wollten weniger verblüffende Aussagen über die Zukunft hören, als vielmehr die reellen Tatsachen der Atomstruktur, der Kernspaltung, der Kettenreaktion und der vielen z. Z. möglichen Anwendungen der Kernenergie. Weiterhin war es stets befriedigend, daß die Zuhörer ohne fachliche Erfahrung, nur mit dem starken Verlangen etwas zu lernen, innerhalb kurzer Zeit zu einem wirklichen Verständnis der Grundprinzipien kommen konnten.

Es wurde oft zum Ausdruck gebracht, daß der Stoff dieser Vorträge in schriftlicher Form einen weiteren Leserkreis finden und zum besseren Verständnis der atomaren Zusammenhänge beitragen dürfte. So stimmte ich sehr gerne zu, als die Harvard University Press vorschlug, von maßgeblicher Seite ein Buch über die Kernenergie zu schreiben, das die friedlichen Belange betont. Dieses Buch stellt also den Stoff dar, der sich im Verlaufe von zwölf Vortragsjahren herausbildete und der so weit

wie möglich in der Art niedergeschrieben wurde, die sich bei der genauen, aber einfachen Behandlung der Grundlagen als erfolgreich erwies. Es ist nicht ein Abriß vieler veröffentlichter Berichte, sondern vermittelt praktisch nur meine eigenen unmittelbaren Kenntnisse auf diesem Gebiet, welches mich seit 1942, als die erste Kettenreaktion gelang, völlig in Anspruch genommen hat.

Dieses Vorwort wird unter etwas ungewöhnlichen Umständen geschrieben — auf der Heimreise von einem einmonatigen Aufenthalt hinter dem Eisernen Vorhang. Zwei Wochen Vorlesungen in Polen und weitere zwei in der Sowjetunion, die ich auf Einladung der dortigen wissenschaftlichen Akademien gehalten habe, gaben mir eine ausgezeichnete Gelegenheit, mehr über das internationale Atom zu erfahren. Gegenwärtig werden die Beziehungen zwischen West und Ost auf wissenschaftlicher Ebene weiterhin besser. Während meines Aufenthaltes in Warschau, Krakau, Moskau und Leningrad konnte ich ohne Zurückhaltung über Fortschritte und Pläne diskutieren. Die Erfahrung, daß meine in Kapitel VII ausgedrückten optimistischen Hoffnungen bezüglich der internationalen Zusammenarbeit durch diesen Besuch in keiner Weise vermindert, sondern tatsächlich etwas verstärkt wurden, befriedigte mich sehr. Die im letzten Satz des Buches geäußerte Voraussage scheint der Verwirklichung schon nahe zu sein, denn die sowjetischen Wissenschaftler diskutieren eifrig über die Abhaltung von ausführlichen Sitzungen über die Forschung hinsichtlich thermonuklearer Reaktionen in Genf.

Die Herausgabe dieses Buches wurde sehr unterstützt durch den Rat von J. D. Elder, dem wissenschaftlichen Herausgeber der Harvard University Press, und durch viele Freunde, die das Manuskript gelesen haben. In vielen Phasen der Niederschrift leistete R. C. Garth große Hilfe, ebenso Frau A. Marshall bei der Reinschrift des Manuskriptes und G. Cox beim Entwurf der Figuren. Viele Illustrationen wurden vom Publication Department of Brookhaven National Laboratory zur Verfügung gestellt. Für all diese Hilfe möchte ich meinen herzlichen Dank zum Ausdruck bringen, ohne sie wäre die Herausgabe des Buches unmöglich gewesen.

D. J. Hughes

I

KERNENERGIE FÜR KRIEG UND FRIEDEN

> Und wird die Atomenergie nicht verboten,
> wird sie uns geradewegs von diesem alten Planeten blasen.
>
> *Unbekannt (1945)*

Die Explosionen über Hiroshima und Nagasaki, Anfang August 1945, unterrichteten die Welt auf dramatische Weise über die im Atomkern enthaltene Energie. Jedoch offenbarten diese beiden Bomben, von denen jede vielen tausend Tonnen hochexplosiven Sprengstoffes entsprach, nur die sich beim Freisetzen der Kernenergie bietenden Vernichtungsmöglichkeiten. Dies war eine Waffe von bisher ungeahnter Macht, deren ausgedehnte Anwendung fast unvorstellbare Zerstörungen anrichten könnte. Die unmittelbare Reaktion einige Tage nach dem durch die neue Waffe beschleunigten Kriegsende war die, einen Weg, wie schwierig er auch sei, zu finden, um einen Atomkrieg zu vermeiden.

Der Erschütterung von Hiroshima und Nagasaki folgten bald viele Vorschläge, die Schaden, der durch die Atomenergie entstehen könnte, verhindern sollten. Obgleich viele davon heute äußerst unrealistisch erscheinen, sind ihre Motive in Anbetracht der damaligen Stimmung doch leicht einzusehen. Die bis dahin in den Atomkernen verschlossene Energie wurde nur zum Unheil freigesetzt, und einige Kilo dieses Stoffes würden ausreichen, Hunderttausende von Menschen zu töten. Die positiven Möglichkeiten der Atomenergie — die Produktion von Elektrizität und radioaktiven Isotopen — waren der Öffentlichkeit noch nicht bekannt. So wurden die alten Vorstellungen wieder laut, daß sich die Physik über unsere soziale Struktur hinausentwickelt habe und eingeschränkt werden sollte. Es wurde ernsthaft vorgeschlagen, daß Untersuchungen über Anwendungen der Kernspaltung verboten werden sollten, oder

daß die Wissenschaftler durch ein Übereinkommen ihre Arbeit auf diesem Gebiet einstellen sollten.

Nach kurzer Zeit aber, tatsächlich war es eine Angelegenheit von Wochen, wurde schon offenkundig, daß es sich nicht einfach darum handelt, ein durch nichts gemildertes Übel auszulöschen. So ungeheuerlich die Vernichtungskraft der Atomenergie auch war, ihre Möglichkeiten für friedliche Zwecke waren noch größer, dies wurde bald allgemein erkannt. In der Tat entstand, als man die etwas verwirrte Öffentlichkeit mit unkritischen Voraussagen über das vollkommene Füllhorn der Atomenergie überschwemmte, bald eine Situation, die der von der Nachricht über die erste Bombe verursachten praktisch entgegengesetzt war. Um diese beiden extremen Ansichten, das Positive und das Negative der Kernenergie, abwägen zu können, wollen wir kurz die vor der ersten Bombenexplosion liegenden Ereignisse auf atomarem Gebiet untersuchen.

Aussichten für eine friedliche Anwendung der Kernenergie vor Hiroshima

Hauptziel der während des Krieges in den geheimen Atomlaboratorien in Argonne, Oak Ridge und Los Alamos durchgeführten Arbeiten war die erfolgreiche Herstellung der Bombe. Den beteiligten Wissenschaftlern wurde jedoch bald klar, daß die Möglichkeiten der Kernenergie für den Frieden über die der völligen Zerstörung weit hinausgingen. Anfang 1945 schien es, daß wir bis zum Sommer aller Wahrscheinlichkeit nach eine geglückte Bombe und damit den Frieden haben würden. Damit hatten wir Zeit, über weitere Folgen nachzudenken. Unter den mit allen Phasen des Projekts vertrauten Wissenschaftlern fanden organisierte Diskussionen statt über die weitgespannte, komplizierte Frage der richtigen Behandlung dieser neuen Kraft nach dem Kriegsende. Aus den begrenzten, für die konstruktiven Belange bereits unternommenen Anstrengungen konnte man schließen, daß die Aussichten in der Tat groß waren. Diese beschränkte Bemühung war nicht Selbstzweck, sondern war, wie wir bald erfahren werden, nicht zu trennen von der Entwicklung der Bombe.

Die Untersuchungen, obgleich sehr begrenzt, hatten gezeigt, daß Uran aller Wahrscheinlichkeit nach zur Erzeugung elektrischer Energie dienen und eines Tages mit Öl und Kohle in Konkurrenz treten kann. Es würde einen Brennstoff darstellen, der praktisch keinen Platz einnimmt, eine reinliche, rauchfreie Gewinnung der Elektrizität gestattet und schließlich sogar wohl billiger als Kohle oder Öl wäre. Die in kleinem Maßstab bereits durchgeführten Experimente zeigten deutlich, daß die radioaktiven Atome oder *radioaktiven Isotope* zur Behandlung von Krankheiten und als *Leitisotope* für zahllose wissenschaftliche und industrielle Anwendungen benützt werden könnten. Die Strahlen dieser Atome könnten lebende Keimzellen verändern, d. h. *Mutationen* hervorrufen und so durch Schaffen neuer Arten des pflanzlichen und tierischen Lebens vielleicht die Entwicklung beschleunigen.

Die Situation der Wissenschaftler, die geheim diese weitreichenden Möglichkeiten und das geeignete Vorgehen zu ihrer Verwirklichung diskutierten, war äußerst dramatisch. Nur ein paar Männer wußten von der in großem Maßstab erfolgenden Freisetzung der Kernenergie, von dem fast sicheren Erfolg ihrer Anwendung als Waffe höchster Wirksamkeit und ihren noch bedeutenderen Anwendungsmöglichkeiten für den Frieden. Während dieser Zeit war ich Mitglied eines Komitees für Soziale und Politische Folgen, das unter dem Vorsitz von Professor James Frank im metallurgischen Laboratorium, dem heutigen Atomenergielaboratorium, in Chikago im Frühling 1945 tagte. Dieses Komitee war beauftragt, einen Weg vorzuschlagen, der geeignet sein könnte, die Vorteile der Atomenergie für die Menschheit nutzbar zu machen.

Angesichts der heute auf der ganzen Welt blühenden Atomenergie-Industrie scheint es ein bißchen sonderbar, daß wir uns damals in dieser Weise plagten. Ich erinnere mich jedoch mit großer Deutlichkeit, daß eine unserer Hauptsorgen die war, daß die Atomenergie nach dem Krieg überhaupt nicht mehr weiterentwickelt werden könnte. Wir wußten, daß für die Entwicklung im Krieg eine Menge Geld aufgewendet wurde und fürchteten, daß, wenn die Möglichkeiten der Öffentlichkeit nicht völlig klargemacht würden, vielleicht die Entwicklung der Wirtschaft nach dem Krieg das Atompro-

gramm gänzlich zum Erliegen bringen würde. Wir fühlten, daß wir als Wissenschaftler um die großen Vorteile wußten, die die Weiterentwicklung der Atomenergie mit sich bringen konnte, aber wir fürchteten, daß die Möglichkeiten dieser Vorteile, vielleicht in weiter Zukunft, vom Kongreß und der Öffentlichkeit nicht verwirklicht werden könnten. So waren wir auf eine überzeugende Demonstration der Macht der im Atomkern enthaltenen Kräfte bedacht, wollten aber nicht, daß diese durch die Massenvernichtung von Menschenleben zum Ausdruck komme. Unser Beschluß war, daß die Bombe zur Explosion gebracht werden sollte, um der Welt die Macht der Atomenergie zu zeigen und diese Macht zur Beendigung des Krieges zu gebrauchen. Wir empfahlen jedoch, die Explosion nicht auf einem bewohnten Ziel, sondern vielmehr als abgemachte Demonstration auf einer unbewohnten Insel vorzunehmen. Auf diese Weise, meinten wir, würden die Japaner zur Übergabe veranlaßt und die daraus resultierende weltweite Kenntnis der Atomenergie würde garantieren, daß sie nicht vergessen wird.

Hier ist nicht der Platz, um die komplizierten Argumente abzuwägen, die nachfolgten und zu der Endentscheidung führten, die Bomben für japanische militärische Ziele zu verwenden. Sie wurden seit jenen frühen Tagen sehr oft diskutiert, ohne daß eine Übereinstimmung erreicht werden konnte. Während die Notwendigkeit der Anwendung der Bombe auf ein wirkliches Ziel, um ein ganzes Volk zu überzeugen, kaum verneint werden kann, gibt es noch viele, die glauben, daß wir durch den tatsächlichen Gebrauch der Bombe bei Hiroshima und Nagasaki einen schwerwiegenden, dauernden Verlust auf moralischer Ebene erlitten haben. Jedoch gab es keinen Zweifel an der öffentlichen Kenntnis der Atomenergie und keine Sorge, daß Mangel an Interesse zu einer Vernachlässigung der atomaren Entwicklung führen könnte. Vielleicht waren wir in jenen frühen Diskussionen zu bescheiden, denn heute scheint es kaum möglich, daß die Entwicklung ohne die Explosion der Bombe aufgehört hätte. Das ganze Programm dürfte ohne militärischen Anreiz langsamer fortgeschritten sein, aber die Betonung hätte sicher weniger auf der Verwendung für Waffen gelegen. Der tatsächliche Gang der Ereignisse vor Hiroshima verursachte jedoch, daß seitdem das ganze Gebiet der Anwen-

dung der Kernspaltung stark von militärischen Gesichtspunkten beeinflußt wird.

Die Doppelrolle der Atomenergie

Als schon bald Informationen über die mannigfaltigen Anwendungsmöglichkeiten der kontrollierten Freisetzung der Kernenergie verfügbar wurden, war es offensichtlich, daß keine einfache Lösung zur Verfügung stand, wie das in dem anfangs zitierten Ausspruch erwähnte „Verbieten". Die Diskussion wählte einen etwas anderen, aber immer noch zu sehr vereinfachten Weg. Das brennende Thema war damals: „Atomenergie für den Krieg *oder* für den Frieden?" Im Herbst und Winter 1945/46, als die Atomwissenschaftler sich in der bemerkenswerten Situation befanden, als öffentliche Redner gesucht zu werden und sogar gedrängt wurden, sich um öffentliche Ämter zu bewerben, wurde von ihnen irgendwie die Beantwortung dieser Frage erwartet. Ich erinnere mich, daß man von mir öfters Berichte erhoffte, was wir Wissenschaftler, nachdem wir das atomare Feuer auf die Erde gebracht hatten, unternehmen würden, daß die Menschheit durch seinen Gebrauch zwar erwärmt, aber nicht verbrannt würde.

Von Wissenschaftlern und ebenso von Nichtwissenschaftlern wurden Mittel gesucht, die den zerstörerischen Gebrauch der Atomenergie vollständig verhindern, ihre nützliche Anwendung aber beschleunigen sollten. Bei einer anderen internationalen Politik im Jahre 1945 wäre die Trennung von Gutem und Schlechtem vielleicht möglich gewesen. Der wichtige Punkt aber ist, daß die Trennung des Guten vom Schlechten nur den *Gebrauch* der Atomenergie durch uns, nicht ihre prinzipielle physikalische Natur betrifft. Wie wir sehen werden, können Bomben nicht einfach verboten werden, denn dadurch würden wir praktisch die Entwicklung industrieller Kraftwerke verhindern. Der Begriff der Atomenergie für Krieg *oder* Frieden ist so stark vereinfacht, daß darauf beruhende Aktionen wahrscheinlich von geringem Wert sind.

Das richtige Bild der Atomenergie zeigt die destruktiven und konstruktiven Möglichkeiten so miteinander verflochten,

daß es unmöglich ist, die einen scharf zu kontrollieren, ohne die anderen stark zu verändern. Die gründliche Ableitung dieser Schlußfolgerung verlangt oft die Diskussion der grundsätzlichen Tatsachen der Kernenergie, die den Hauptteil dieses Buches einnimmt. Wir können aber schon jetzt, ohne Verwendung der Kernphysik, einige Beziehungen zwischen den friedlichen und den kriegsmäßigen Anwendungen aufzeigen. Fehlt diesem Aufzeigen auch die volle Überzeugungskraft, so ist es doch ein erster Schritt und wird zumindest helfen zu zeigen, warum eine gut fundierte Ansicht über die Atomenergie für Frieden und Krieg nur nach einigem Studium ihrer Prinzipien gewonnen werden kann.

Gegenwärtig herrscht in den Vereinigten Staaten auf dem Gebiet der Atomenergie für Krieg *und* Frieden eine ungeheure Aktivität. Das Budget der Atomenergie-Kommission allein beläuft sich auf jährlich 2 Milliarden Dollar, und zu dieser Zahl müssen noch die Hunderte von Millionen gerechnet werden, welche die Industrie jährlich für die privat finanzierte Atomentwicklung ausgibt. Allein die Investierung der Regierung für die Atomenergie beträgt etwa 10 Milliarden Dollar, mit einem zusätzlichen (geheimgehaltenen) Geldbetrag, dem unser Vorrat an Bombenmaterial entspricht. Das schnelle Wachstum

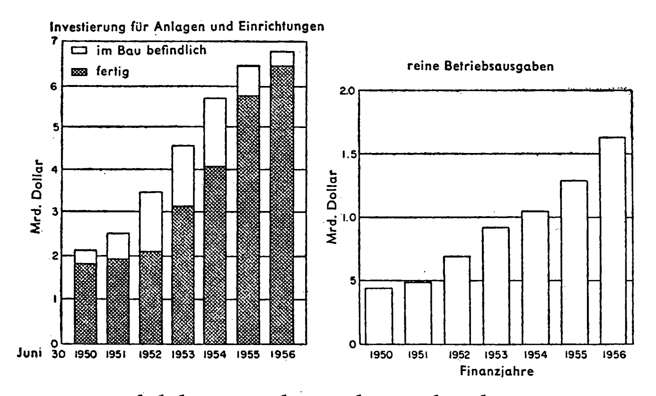


Fig. 1. Die jährlichen Betriebsausgaben und Anlageninvestitionen der Atomenergiekommission; entnommen dem halbjährlichen Bericht der Kommission für den Kongreß vom Januar 1957.

der jährlichen Betriebsausgaben und Anlageinvestierung der Atomenergie-Kommission, wie es Figur 1 darstellt, zeigt bis jetzt wenig Anzeichen einer Sättigung. Die Größe der Investition für die Atomenergie wird noch augenfälliger, wenn wir uns vergegenwärtigen, daß zur Zeit jeder Familie in den Vereinigten Staaten im Durchschnitt etwa 300 Dollar des Atomenergiegeschäftes der Regierung gehören. So kann jeder einzelne mit Recht empfinden, daß es *sein* Geschäft ist. Er hat Anspruch darauf, um dessen Beziehung zu Krieg und Frieden zu wissen, und ebenso die Pflicht, etwas davon zu verstehen, wie man dieses Geschäft vernünftig leitet.

Einige Gebiete der Atomenergiearbeit kann man eindeutig als kriegs- oder friedensorientiert bezeichnen. So ist das für die Untersuchung der Explosionsmöglichkeiten von Bomben, um möglichst große Wirksamkeit zu erreichen, ausgegebene Geld sicher für Kriegszwecke bestimmt, da hier kaum Möglichkeiten einer konstruktiven Anwendung denkbar sind. Andererseits dient das für die Erzeugung von radioaktiven Isotopen zur Krebsbehandlung ausgegebene Geld sicher einer nützlichen, militärisch bedeutungslosen Anwendung der Kernenergie. Diese beiden Fälle sind sehr leicht voneinander abzugrenzen, aber sie stellen nur einen kleinen Teil der jährlich ausgegebenen 2 Milliarden Dollar dar.

Ein besonders großer Teil der Ausgaben dient der Produktion *spaltbarer Stoffe*, das sind Plutonium und Uran-235. Diese Stoffe werden in großen Kernreaktoren in Hanford und am Savannah-Fluß hergestellt oder in Isotopentrennungsanlagen, die an mehreren Orten über das ganze Land verstreut sind. Nach ihrer Gewinnung werden diese Stoffe nicht sofort verbraucht, sondern aufgespeichert. In diesem Stadium kann man nicht sagen, ob die spaltbaren Stoffe für militärische oder friedliche Zwecke bestimmt sind. Sie können schnell in atomaren Sprengköpfen Verwendung finden, sie können als Treibstoff für Unterseeboote dienen, sie können für den Bau eines Reaktors, der wertvolle radioaktive Isotope produziert, benützt werden, oder sie können in einem großen Kraftwerk verbraucht werden, wobei sie in viele tausend Kilowattstunden elektrischer Energie verwandelt werden.

Wer kann also sagen, für welchen Zweck die großen, zur

Erzeugung von spaltbaren Stoffen benutzten Geldbeträge bestimmt sind? Ob diese Materialien für den Frieden oder den Krieg Anwendung finden, hängt nicht davon ab, auf welche Weise der Kongreß das Jahresbudget ratifiziert hat, sondern von dem Verlauf der politischen Aktionen in diesem und den nächsten zehn Jahren. Die Produktion dieser Stoffe ermöglicht tatsächlich die Verwendung der Kernenergie für Frieden *und* Krieg. Jeder lohnende Plan, der den Nutzen der Atomenergie erstrebt und ihre zerstörende Gewalt vermeiden will, muß berücksichtigen, daß sie in den meisten Fällen gleichzeitig für Frieden und Krieg angewandt werden kann und eine strenge Kontrolle eines Teilgebietes unvermeidlich die anderen beeinflußt. Der Versuch, den Fortschritt von Wissenschaft und Technik auf einem bestimmten Betätigungsfeld mit willkürlichen Mitteln anzuhalten, bedeutet, der gesamten Wissenschaft und Technik einen großen Schaden zuzufügen. Ein guter Plan zur Kontrolle der Kernenergie muß eine möglichst freie Entwicklung aller Teilgebiete vorsehen. Es ist Sache staatsmännischer Kunst, sicherzustellen, daß das Leben der Menschheit durch die Entwicklung bereichert und nicht zerstört wird, anstatt einen Zweig der Forschung durch Verbot zu unterdrücken.

Diese kurze Vorschau über die engen Beziehungen zwischen den guten und schlechten Möglichkeiten der Spaltung entspricht nur einer Feststellung, der sicher die Überzeugungskraft fehlt, wenn sie nicht von den zuverlässigen Tatsachen der Kernphysik untermauert wird. Um nicht nur eine Überzeugung, sondern auch ein Verständnis der Art und Weise zu erlangen, wie die Grundtatsachen der Natur, hier die Spaltung und die Fusion von Kernen, der Menschheit nützen oder schaden können, sind einige Kenntnisse der Kernphysik erforderlich. Glücklicherweise beruht die benötigte Kernphysik auf einigen grundsätzlichen Eigenschaften der Materie, deren Verständnis nur etwas geistige Anstrengung und kaum lange fachliche Erfahrung voraussetzt. Es ist wirklich ein glücklicher Umstand, daß der intelligente Laie, wenn er nur gewillt ist, die nötige Zeit aufzubringen, diese Tatsachen begreifen kann. Nur mit Hilfe dieses Verständnisses ist es ihm möglich, vernünftige Entscheidungen über die Disposition, die Kontrolle

und den geeigneten Nachdruck bei der Entwicklung der Atomenergie zu treffen. Wir wenden uns nun der Betrachtung der Prinzipien der Kernphysik zu, den Tatsachen der Spaltung und der Fusion, deren Verständnis eine weitere Aufgabe des guten Bürgers der modernen Welt geworden ist. Wir hoffen, daß es eine angenehme Aufgabe sein wird, denn die Art, wie die Energie an die im submikroskopischen Kern befindlichen Neutronen und Protonen gebunden ist und doch bei dem heftigen Ausbruch der Spaltung frei wird, ist keineswegs uninteressant, sondern besitzt etwas Wunderbares und sogar Schönes.

II

GRUNDLAGEN DER SPALTUNG UND DER FUSION

> Atomare Energieversorgung der Welt absurd, berichten Wissenschaftler —
> Lord Rutherford spottet über die Theorie einer Bändigung der Energie in Laboratorien.
>
> *Überschrift eines Titelseiten-Berichtes*
> *New York Herald Tribune*
> *12. September 1933.*

Alle die vielen gegenwärtigen Unternehmungen auf dem Gebiet der Atomenergie beruhen auf einer fundamentalen Naturerscheinung, dem explosionsartigen Zerbrechen schwerer Atome, das man als *Kernspaltung* bezeichnet. Seit ihrer Entdeckung im Jahre 1939 spielt sie die Hauptrolle bei den stark zunehmenden Anwendungen der Atomenergie für Krieg und Frieden. Lange vorher kannte man schon Vorgänge, die aus dem Inneren des Atomkerns Energie freisetzen konnten. Tatsächlich wurde schon 1914 die Umwandlung von Masse in Energie, in Übereinstimmung mit Einsteins Gleichung, nachgewiesen, allerdings in kleinem, hauptsächlich atomarem Maßstab. Aber die Kernspaltung war ein völlig neuer und sogar unerwarteter Prozeß, eine bedeutend heftigere Explosion als alle bisher bekannten Kernreaktionen. Zusätzlich hatte sie eine besondere Eigenheit, die unter geeigneten Bedingungen die Fortpflanzung der Explosion auf benachbarte Kerne ermöglichte. Bei dieser Selbstfortpflanzung werden mikroskopische Energiemengen freigesetzt. Läßt man diesen Prozeß schnell genug ablaufen, so würde er die Explosion einer Bombe von im Prinzip unbegrenzter Größe darstellen. Es geht also um mehr als die schon bekannte Freisetzung der Energie einzelner Atome.

Die Gründe für den ungeheuren Unterschied zwischen der

frei werdenden Energie bei der Verbrennung von Kernen, wie sie bei der Spaltung stattfindet, und der gewöhnlichen chemischen Verbrennung von z. B. Kohle, Benzin oder sogar TNT, liegen in der Grundnatur der Materie. Die Kernspaltung und die chemische Verbrennung unterscheiden sich grundsätzlich, nicht nur quantitativ. Ebenso wie man für das Verständnis der Kohleverbrennung einige chemische Grundkenntnisse benötigt, erfordert das Verstehen der Kernverbrennung einige Kenntnisse der Kernstruktur. Das Verständnis dieser Grundlagen der Kernphysik erfordert aber keine gründliche mathematische Ausbildung. Tatsächlich besitzen solche Naturgesetze eine gewisse Einfachheit, was zur Folge hat, daß man sie ohne übermäßige Anstrengung begreifen kann. So wollen wir, anstatt bloße Feststellungen wie „1 kg Uran entspricht x Tonnen Kohle" zu machen, lieber zur Untersuchung einiger Grundtatsachen der Kernstruktur fortschreiten. Mit etwas Anstrengung ist es uns dann möglich, den Mechanismus der Kernspaltung und die Gründe für die millionenmal größere Energieerzeugung gegenüber der chemischen Verbrennung einzusehen und zu beurteilen. Die sensationellen Feststellungen können natürlich wahr sein, aber wenn wir wissen, *warum*, verlassen sie das Reich wissenschaftlicher Erzählungen, und unsere Beurteilung wird durch Sachkenntnis wesentlich vertieft.

Wir müssen untersuchen, wie die Neutronen und Protonen die Kerne, diese und die Elektronen die Atome bilden und wie die Atome in die gewöhnlichen Stoffe, die wir als Wasser, Eisen, Kupfer usw. kennen, eingebaut sind. Das Wissen über den Aufbau der gewöhnlichen Stoffe aus diesen Elementarteilchen läßt uns dann verstehen, wie beim umgekehrten Prozeß, bei der Vernichtung von Materie, solch gewaltige Naturkräfte frei werden.

Atome und Moleküle

Wenn wir davon sprechen, in welcher Weise sich zwei Atome Wasserstoff mit einem Atom Sauerstoff zu Wasser verbinden, oder wie sich die Kohle (sie besteht aus Kohlenstoff) mit Sauerstoff zu Kohlendioxyd verbindet, ein Prozeß, der als Ver-

brennung bezeichnet wird, so sprechen wir nicht als Kernphysiker, sondern als Chemiker. Die Vorgänge, bei denen sich die einfachsten Stoffe, die *Elemente,* zu komplizierten Substanzen, den *Verbindungen,* vereinigen, die ihrerseits wieder in ihre Elemente zerlegt werden können, bezeichnet man als *chemische Reaktionen.* Reaktionen, wie die Bildung von Wasser und Kohlendioxyd aus ihren Elementen, sind besonders einfach und den Chemikern seit Generationen vertraut. Die durch sie verursachten Änderungen der Materiestruktur sind im Vergleich mit den heute in der Kernphysik bekannten tiefgreifenden Änderungen nur gering.

Im Verlaufe von etwa 50 Jahren erlangte man zuverlässige Grundlagen der atomaren Struktur der Materie. Wir wissen heute sicher, daß alle Stoffe aus *Atomen* aufgebaut sind, auch wenn diese Teilchen viel zu klein sind, um sie einzeln mit dem leistungsfähigsten Mikroskop sehen zu können. Einen nur aus einer Art von Atomen bestehenden Stoff bezeichnet man als *Element.* Das Gas Sauerstoff z. B., das 20% der gewöhnlichen Luft ausmacht, enthält nur Sauerstoffatome und ist deshalb ein Element; ebenso Wasserstoff, Kohlenstoff, Kupfer, Zink und Zinn, die jeweils nur aus einer speziellen Art von Atomen bestehen. Als das Atomzeitalter begann, waren 92 solche Elemente bekannt. Die Isolation und Einordnung dieser 92 Elemente, welche vom Wasserstoff, der aus dem leichtesten und einfachsten Atom aufgebaut ist, bis zum Uran mit dem schwersten Atom reichen, erforderte die geduldige Anstrengung von Chemikern vieler Generationen. Mit Hilfe der Atomenergie gelang die Herstellung einiger neuer, noch schwererer Elemente, die der Liste zugefügt werden müssen. Die neuesten Elemente sind: Einsteinium, Fermium und Mendelevium, nach drei überragenden Gelehrten der modernen Wissenschaft benannt: Einstein, einem Deutschen, Fermi, einem Italiener, und Mendelejeff, einem Russen.

Ein Atom eines Elementes ist die kleinste mögliche Einheit dieses Stoffes. Wenn wir z. B. etwas Sauerstoffgas in immer kleinere Teile zerlegen, bleibt das Gas immer Sauerstoff, bis wir schließlich die letzte Grenze erreichen in Form eines Teilchens, eben eines Atoms Sauerstoff. Eine weitere Teilung würde die charakteristischen Eigenschaften dieses Atoms än-

dern; es wäre dann kein Sauerstoffatom mehr. Mit anderen Worten, wir würden dann das Sauerstoffatom zerbrechen, eine Veränderung, die völlig anderer Natur ist als das bloße Abtrennen eines Sauerstoffatoms von jedem anderen; eine Veränderung, die außerdem ungeheuer viel mehr Energie erfordert, wie wir noch erfahren werden.

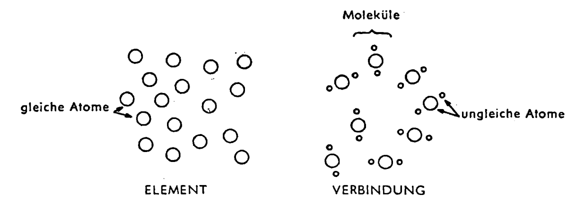


Fig. 2. Die kleinsten Teile, in die sich ein Element zerlegen läßt, sind die Atome, für eine Verbindung sind die kleinsten Teile die Moleküle, die aus zwei oder mehr Atomen aufgebaut sind.

Verbinden sich die Atome in chemischen Reaktionen, wie z. B. ein Atom Sauerstoff mit zwei Atomen Wasserstoff zu Wasser, so bleiben die Atome selbst praktisch unverändert. Könnten wir mit einer Art Supermikroskop ein *Molekül* Wasser betrachten — mit dem Wort Molekül bezeichnet man diejenige Kombination verschiedener Atome, welche die kleinste Einheit einer chemischen *Verbindung* darstellt —, so würden wir wahrnehmen, daß die Sauerstoff- und Wasserstoffatome in dem Wassermolekül erhalten bleiben. Durch die elektrische Anziehung ihrer Randbereiche werden sie, ohne daß der Mittelteil eines Atoms durch die anderen Atome irgendwie beeinflußt wird, in Form eines stabilen, relativ inaktiven Wassermoleküls zusammengehalten. Der korrekte Gebrauch dieser Ausdrücke, die wir so schnell lernten — Atom, Molekül, Element und Verbindung —, wird vielleicht durch Fig. 2 erleichtert, welche die verschiedenen zwischen ihnen bestehenden Beziehungen illustriert. Im einzelnen ist der Zusammenhalt der verschiedenen Atome in den Verbindungen ein sehr komplizierter Sachverhalt, der die Grundlage der gesamten Chemie darstellt, für uns aber nicht von unmittelbarem Interesse ist.

Unser Hauptanliegen ist hier, klarzulegen, daß bei chemischen Reaktionen oder Änderungen nur die äußerste Hülle des

Atoms in Mitleidenschaft gezogen wird, also lediglich die am Rand befindlichen, an den Rest des Atoms schwach gebundenen *Elektronen.* Ein Elektron ist die kleinste mögliche Einheit der Elektrizität, es ist negativ geladen und äußerst leicht. Sich durch einen Draht bewegende Elektronen stellen einen elektrischen Strom dar, wenn sie auf den Schirm einer Fernsehröhre auftreffen, erzeugen sie das sichtbare Bild. Die Art der Verbindung von Atomen zu Molekülen ist von relativ kleinen Änderungen der räumlichen Anordnung der Elektronen an der Oberfläche der Atome abhängig. Die Betrachtung dieser Änderungen erklärt z. B., warum sich von einer Art Atome gerade eine bestimmte Anzahl mit anderen Atomen zu einem Molekül vereinigt, oder die Leichtigkeit, mit der sich Atome verbinden oder voneinander trennen lassen. Chemie *ist* Änderung der Elektronenhülle, die durch die Millionen von Verbindungen, die aus den 92 in der Natur vorkommenden Elementen aufgebaut werden können, offenkundig wird.

Die innere Struktur des Atoms

Zu einer Zeit, als man über den inneren Aufbau der Atome praktisch noch nichts wußte, wurde ihr Verhalten bei chemischen Reaktionen empirisch bereits gut verstanden. Man brauchte über diese Struktur wenig zu wissen, weil sie sich ja während der chemischen Prozesse, an denen lediglich einige Elektronen an der Oberfläche des Atoms beteiligt sind, nicht ändert. Heute wissen wir nicht nur mehr über die innere Struktur, sondern wir wissen auch, wie wir sie verändern können. Die Methoden für die Umwandlung des Atominnern erfordern im Vergleich zu denen für die Erzeugung chemischer Reaktionen bedeutend mehr Energie, was darauf schließen läßt, daß die Kräfte, die das einzelne Atom zu einer Einheit zusammenschließen, viel größer sind als die, welche bei der Verbindung von Atomen untereinander auftreten.

Als man die Grundlagen der chemischen Reaktionen empirisch verstand und die Kernphysik noch nicht existierte, stellte man sich die Atome als harte strukturlose Kugeln vor, mit Ausnahme der für chemische Belange maßgeblichen Ober-

flächenladungen. Der englische Physiker Rutherford zeigte jedoch im Jahre 1911, daß das Gewicht des Atoms praktisch in einem winzigen, im Mittelpunkt gelegenen Stück dichter Materie zusammengefaßt ist und sich im größten Teil des Atomvolumens leichte Elektronen aufhalten, die mit hoher Geschwindigkeit umlaufen. Alle diese Elektronen sind gleich, eben die kleinsten Teilchen der Elektrizität, wie es schon besprochen wurde. Trotzdem sind es nur die wenigen äußersten Elektronen, die, um die zentrale Masse kreisend, mit den Elektronen anderer Atome in Wechselwirkung treten und so die Bildung von Molekülen verursachen.

Den Aufbau eines typischen Moleküls zeigt Fig. 3 mit der Darstellung eines Moleküls Wasser, bestehend aus zwei Atomen Wasserstoff und einem Atom Sauerstoff, oder H_2O, wie die chemische Bezeichnung lautet. Das Sauerstoffatom besitzt 8 Elektronen und die Wasserstoffatome jeweils eines. Die re-

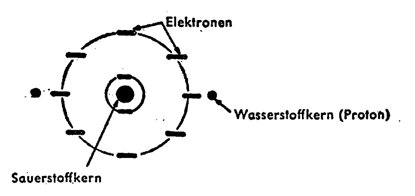


Fig. 3. Die Anordnung der Kerne und Elektronen in einem Molekül Wasser, H_2O. Die Stabilität des H_2O-Moleküls ist darauf zurückzuführen, daß bei der Verbindung von zwei Wasserstoffatomen mit einem Sauerstoffatom besonders stabile Elektronenschalen entstehen, nämlich solche, die zwei und acht Elektronen enthalten.

sultierende Verbindung ist besonders stabil. Die Stabilität beruht auf dem Streben der Elektronen, um den Kern „Schalen" zu bilden, wobei die erste Schale zwei Elektronen, die zweite acht, dann 16 usw., enthält. Wenn die Verbindung mehrerer Atome eine aufgefüllte Schale zur Folge hat, wie die Schale mit den 8 Elektronen beim Sauerstoff in Fig. 3, so ist das resultierende Molekül, in diesem Fall Wasser, sehr stabil.

Es ist das Stück dichter Materie — der *Kern* —, das die Quelle der Atomenergie ist. Außer daß der Kern den größten Teil

des Atomgewichtes bildet, ist er positiv geladen, und zwar ist seine Ladung gerade so groß, daß die negative Ladung der um ihn kreisenden Elektronen ausgeglichen wird. Wegen dieses Ladungsgleichgewichts ist das Atom als Ganzes neutral, was auch notwendig ist, da andernfalls die elektrische Abstoßung zwischen den Atomen ein Auseinanderfliegen aller Materie zur Folge haben würde. Der Kern bleibt auch bei der heftigsten chemischen Reaktion völlig unverändert. Wenn jedoch der Kern verändert wird, wie, werden wir bald erfahren, so sind die auftretenden Kräfte bedeutend größer als die von den Elektronen erzeugten, die für die chemischen Umwandlungen maßgebend sind. Unglücklicherweise hat sich die Bezeichnung „Atom"energie für die aus den gewaltigen Kernkräften herrührende Energie stark eingebürgert, denn tatsächlich handelt es sich um „Kernenergie". Da man kaum erwarten kann, daß der Name Atomenergie-Kommission in Kernenergie-Kommission geändert wird, müssen wir unter dem Ausdruck „Atomenergie" die „Energie aus dem Kern des Atoms" verstehen.

Der Kern

Diese einfachen Kenntnisse des Atomkerns besaß man schon viele Jahre vor der Entdeckung der eigentlichen Bestandteile des Kernes. Der Kern des leichtesten Atoms, also der des *Wasserstoffs,* schien besonders einfacher Natur zu sein, und man nannte ihn deshalb das *Proton.* Da das Wasserstoffatom nur ein umlaufendes Elektron enthält, muß die Ladung des Protons der Größe nach gleich der des Elektrons, dem Vorzeichen nach aber entgegengesetzt, also positiv, sein. Das Proton ist bedeutend schwerer als das Elektron, sein Gewicht beträgt etwa das 1800fache von dem des Elektrons. Die anderen Atomkerne sind alle schwerer als der von Wasserstoff, und ihre positive elektrische Ladung ist größer, um die größere Zahl der umlaufenden Elektronen auszugleichen, die für Sauerstoff (Fig. 3) z. B. 8 beträgt. Es war aber klar, daß andere Kerne als der Wasserstoffkern neben Protonen auch noch andere Teilchen enthalten mußten, denn ihr Gewicht war viel

größer, als man es von den Protonen allein erwarten konnte. So hat das in der Reihenfolge des Gewichts 92. Atom, nämlich *Uran*, bei einer Kernladung, die 92mal so groß ist wie die des Protons, ein über 200mal größeres Gewicht als das Proton.

1932 entdeckte man ein neues Elementarteilchen, das sich für die Erklärung der Kernstruktur sofort von großem Wert erwies. Dieses neue Teilchen, das *Neutron*, hatte fast das

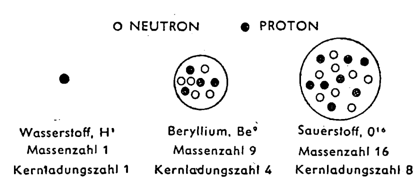


Fig. 4. Der Aufbau der Kerne verschiedener Elemente aus Neutronen und Protonen.

gleiche Gewicht wie das Proton, besaß aber keinerlei elektrische Ladung. Es war eigentlich sofort klar, daß es sich um das zusätzlich im Kern vorhandene Teilchen handeln mußte, das dem Kern ermöglicht, eine große Masse zu haben, ohne gleichzeitig eine entsprechend große elektrische Ladung zu besitzen. Man kann also z. B. eine bestimmte Uranart, deren Gewicht ungefähr das 235fache von dem des Protons ist und deren Ladung 92mal so groß ist, einfach durch die Annahme erklären, daß der Kern zusätzlich 143 Neutronen enthält.

Wir sehen also, daß man auf diese Weise die Masse und die elektrische Ladung eines Kerns relativ einfach erklären kann. Die Masse des Kerns ist durch die gesamte Anzahl der im Kern vorhandenen Protonen und Neutronen, die sogenannte *Massenzahl*, bestimmt. Die in der Chemie aus praktischen Gründen eingeführte Definition des *Atomgewichtes* legt als Gewichtseinheit den 16. Teil des Gewichtes eines Sauerstoffatoms zugrunde, dabei muß allerdings ein im nächsten Abschnitt betrachteter Sachverhalt berücksichtigt werden. Drückt man das Gewicht eines Atoms in diesen Gewichtseinheiten aus, so unterscheidet sich sein Zahlenwert nur sehr wenig von der Massenzahl des Atomkerns. Die elektrische Ladung des Kerns ist allein durch die Zahl der Protonen bestimmt; Fig. 4 zeigt

den Aufbau verschiedener Kerne aus Protonen und Neutronen, die Massenzahl ergibt sich jeweils aus der Zahl der Protonen plus der Zahl der Neutronen. Die Zahl der den Kern umgebenden Elektronen muß gleich der Anzahl der Protonen sein, weil die Materie im ungestörten Zustand elektrisch neutral ist. Das Verhalten des Atoms bei chemischen Reaktionen ist fast ausschließlich durch die Zahl der in ihm enthaltenen Elektronen bestimmt, wie es in Fig. 3 für die Bildung eines Wassermoleküls gezeigt ist. Wegen des engen Zusammenhanges zwischen der Anordnung der Elektronen und den *atomaren* Wechselwirkungen im Gegensatz zu den *Kern*wechselwirkungen teilt man verschiedene Atome oder Elemente am besten nach der Zahl ihrer Elektronen ein, die gleich der Zahl der Protonen ist. Diese Zahl bezeichnet man einfach als *Atomnummer* (auch Ordnungszahl), sie ist 1 für Wasserstoff, 92 für Uran, 94 für Plutonium usw., bis zur höchsten bisher erreichten Atomnummer 101, der von Mendelevium.

Isotope

Bei der Besprechung verschiedener Atomgewichte begegnen wir einer leichten Schwierigkeit. Es ist nämlich möglich, daß die einzelnen Atome eines Elementes in ihren Kernen verschieden viele Neutronen haben. Weil jedoch, wie wir gerade gesehen haben, die chemischen Eigenschaften eines Atoms durch die Anzahl der Elektronen bestimmt sind, zeigen diese Atome gleicher Ordnungszahl, aber verschiedenen Gewichtes bei allen gewöhnlichen chemischen Veränderungen das gleiche Verhalten. So können wir leicht einsehen, daß Wasserstoff, der in der Regel in seinem Kern nur ein Proton hat, auch einen Kern mit einem Proton und einem Neutron haben kann. Diese zweite Art von Wasserstoff, die schwerer ist, reagiert praktisch in der gleichen Weise, z. B. bildet sie bei der Verbindung mit Sauerstoff Wasser. Die Einführung des Fachausdruckes für diesen Sachverhalt dürfte seiner wesentlichen Einfachheit nicht schaden, man spricht hier von *Isotopen*, das sind Atome eines bestimmten Elementes, die sich im Gewicht, aber nicht in der Ladung unterscheiden. Um auf die Terminologie zurückzu-

kommen, man sagt, daß der schwere Wasserstoff, auch *Deuterium* genannt, ein Isotop des Wasserstoffs ist, welches das Atomgewicht 2 hat. Es gibt noch ein drittes Isotop des Wasserstoffs, mit zwei Neutronen und einem Proton, diese Art nennt man *Tritium,* ein wichtiger Bestandteil der H-Bombe.

Man könnte sich vielleicht wundern, warum wir uns die Mühe machen, die Isotope so ausführlich zu behandeln, da sie sich doch bei allen gewöhnlichen Wechselwirkungen praktisch gleich verhalten. Schwerer Wasserstoff bildet in der Verbindung mit Sauerstoff schweres Wasser, das von gewöhnlichem leichten Wasser fast nicht zu unterscheiden ist. Als Getränk würde es vielleicht etwas teuer sein, aber sonst ist es von normalem Wasser praktisch nicht im geringsten verschieden. Das Verständnis der Isotope aber ist von grundlegender Bedeutung, wenn wir die Grundlagen der Kernenergie diskutieren. Der Grund liegt darin, daß bei der Betrachtung der tiefgreifenden Wirkungen, welche die Umwandlung eines Atoms in ein anderes, also eine *Kernumwandlung,* hervorruft, der genaue Aufbau des beteiligten Kernes äußerst wichtig ist. Mit anderen Worten: obgleich schweres Wasser und

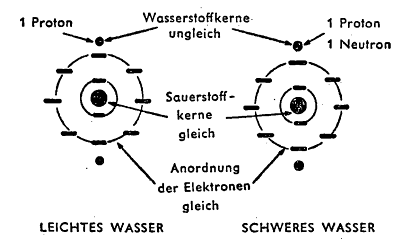


Fig. 5. Der Aufbau von leichtem und schwerem Wasser; die atomare Struktur (d. h. die Anordnung der Elektronen) ist für beide Moleküle gleich, aber die Kerne der Wasserstoffatome sind verschieden.

gewöhnliches „leichtes" Wasser bei den meisten Prozessen praktisch gleich reagieren, sind sie ungemein verschieden, wenn es sich um Kernumwandlungen handelt. Die Ähnlichkeit der Atome und die Verschiedenheit der Kernstruktur von schwerem und leichtem Wasser zeigt Fig. 5. Ein anderes Bei-

spiel bilden, wie wir bald erfahren werden, zwei Isotope des Urans, von denen der Kern des einen 235, der Kern des anderen 238 Teilchen enthält und die sich in ihren Kerneigenschaften grundlegend unterscheiden. Das erstere wird für die Atombombe und die kontrollierte Kettenreaktion von Kernen gebraucht, das letztere zeigt aber die für die Kettenreaktion wesentliche Erscheinung nicht.

Wegen der Wichtigkeit des Unterschiedes zwischen Isotopen wird es für uns sehr zweckmäßig sein, die einfache Terminologie zu lernen, die man beim Studium der Kerne für die Bezeichnung der Isotope benützt. So schreiben wir H^1, H^2 und H^3 für die drei Isotope des Wasserstoffs, deren Kerne null, ein und zwei Neutronen enthalten und mit Proton, Deuteron und Triton bezeichnet werden. Auch C^{12}, das bei weitem häufigste Kohlenstoffisotop, enthält sechs Protonen und sechs Neutronen, während C^{13} und C^{14} ein und zwei Neutronen mehr enthalten. (Das letztere ist das für die Altersbestimmung von jahrtausendealten Stoffen so nützliche Isotop.) Wir schreiben auch U^{235} und U^{238} für die bekanntesten Uranisotope, und Pu^{239} für das künstlich hergestellte, für die Atomenergie so wichtige Plutoniumisotop. Manchmal schreiben wir ${}_6C^{12}$, ${}_{92}U^{235}$ oder ${}_{94}Pu^{239}$, um uns an die Zahl der Protonen oder die positive Ladung der Kerne zu erinnern, obgleich das überflüssig ist, weil aus der Tatsache, daß ein spezielles Atom Kohlenstoff, Uran oder Plutonium *ist*, wie es das Symbol C, U oder Pu angibt, folgt, daß es das 6. oder 92. oder 94. Element ist.

Stabilität des Kerns

Bei der Untersuchung der 101 bekannten Elemente, von denen jedes eine Anzahl von Isotopen hat, Zinn z. B. mehr als 20, ergibt sich bald eine Reihe interessanter Tatsachen. In einem bestimmten Isotop kann die Zahl der Neutronen im Vergleich zur Zahl der Protonen ungewöhnlich groß oder klein sein. In diesem Fall ist der Kern *instabil* und neigt dazu, in einen Zustand mit normalem Neutronen-Protonen-Verhältnis überzugehen, dabei gibt er in irgendeiner Form Energie ab. Diese von instabilen Kernen emittierte Energie ist

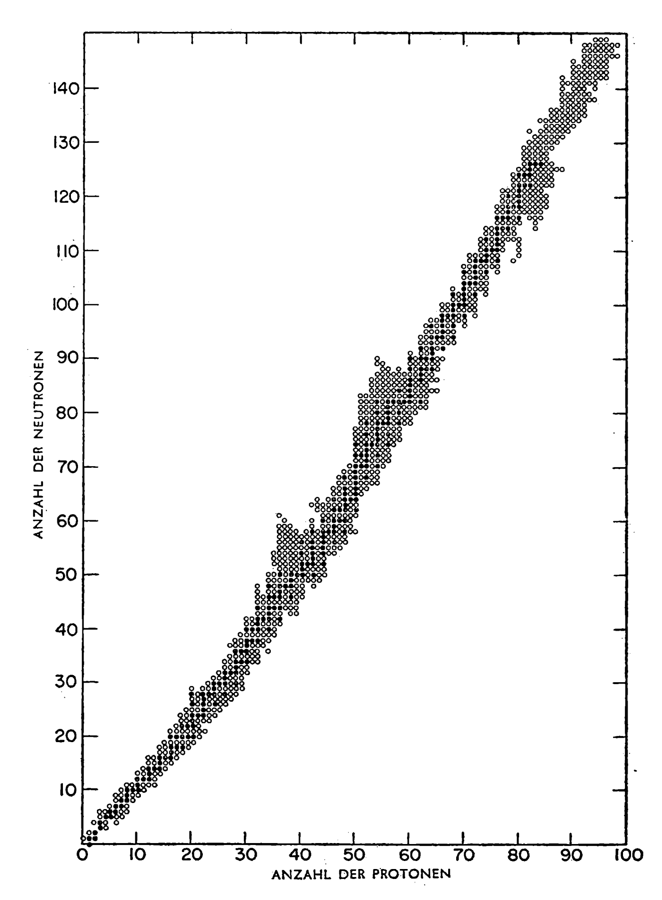


Fig. 6. Dieses Diagramm zeigt die Zahl der in stabilen und instabilen Kernen enthaltenen Neutronen und Protonen. Die instabilen Kerne, dargestellt durch freie Kreise, emittieren Strahlung und verwandeln sich in stabile Kerne, die durch volle Kreise dargestellt sind. Zum Beispiel stellen die bei einem Proton auf einer senkrechten Linie liegenden Kreise die Kerne H^1, H^2 und H^3 dar, der letztere ist instabil. Bei leichten Kernen ist die Zahl der Neutronen ungefähr gleich der Zahl der Protonen, aber bei den schweren Kernen ist die Zahl der Neutronen größer.

in der Atomenergie-Industrie von äußerst großer praktischer Bedeutung und sogar eine Gefahr.
Die leichtesten Kerne sind am stabilsten, wenn die Zahl der Neutronen und die Zahl der Protonen ungefähr gleich sind, die schwersten Kerne haben mehr Neutronen als Protonen. Diese Tatsache läßt sich mit Worten leicht ausdrücken, aber einem Wissenschaftler wird sie durch eine graphische Darstellung wesentlich genauer aufgezeigt. Wir bringen diese Darstellung (Fig. 6) hauptsächlich, um zu zeigen, wie sich die Gegebenheiten der Natur auf solche Weise deutlich machen lassen. Für diejenigen, welche eine weniger fachgerechte Art vorziehen, genügt die Feststellung: Elemente mit niederem Atomgewicht neigen dazu, gleich viel Neutronen wie Protonen in ihrem Kern zu haben, mit zunehmendem Atomgewicht aber ergibt sich ein wachsender Überschuß an Neutronen.

In der Figur ist für sehr viele Kerne die Zahl der Neutronen und Protonen aufgetragen, die vollen Kreise entsprechen stabilen Isotopen. Die Mitte des Bereiches der vollen Kreise ergibt also den durchschnittlichen Aufbau dieser stabilen Isotope, d. h. die mittlere Zahl der Neutronen für irgendeine Atomnummer (Anzahl der Protonen). Die sich so ergebende Kurve zeigt, daß zur Atomnummer 50 im Mittel 70 Neutronen und zur Atomnummer 80 im Mittel 120 Neutronen gehören. Die offenen Kreise bezeichnen Isotope, die vorkommen, aber instabil sind. Diese instabilen Isotope geben in Form von Strahlung Energie ab und wandeln sich so in ein anderes Isotop um, das auch wieder instabil sein kann, bis schließlich nach einer Reihe von Zerfällen ein stabiles, in der Figur durch einen vollen Kreis gekennzeichnetes Isotop erreicht wird. Isotope, deren Kerne sich ohne äußere Einwirkung unter Emission von Strahlung umwandeln, bezeichnet man als radioaktive Isotope oder Radioisotope.

Die mittlere Lebenszeit von Radioisotopen ist sehr verschieden. Manche existieren, bevor sie sich durch *radioaktiven Zerfall* in andere Isotope umwandeln, im Mittel nur einige millionstel Sekunden, andere aber sind fast stabil und existieren im Mittel Tausende, Millionen und sogar Milliarden Jahre. Nur die letzteren fast stabilen Isotope kommen in der Natur in größeren Mengen vor; das berühmteste, natürlich radioaktive

Element ist das von den Curies in Frankreich abgetrennte Radium, das in der Medizin viele Anwendungen gefunden hat.

Beim Zerfall der radioaktiven Isotope zeigt sich, wie groß die Kräfte sind, welche die Neutronen und Protonen im Kern zusammenhalten. Die beim radioaktiven Zerfall freiwerdende Energie ist ungefähr eine Million mal größer als die bei einer chemischen Reaktion, also bei Veränderungen der Elektronenhülle, entstehende Energie. In der Atomphysik verwendet man als Energieeinheit gewöhnlich das *Elektronenvolt,* das ist der Energiebetrag, den ein Elektron beim Durchlaufen einer Potentialdifferenz von einem Volt empfängt. Während also bei einer chemischen Reaktion, z. B. bei der Vereinigung eines Kohlenstoffatoms mit zwei Sauerstoffatomen, eine Energie von einigen Elektronenvolt entsteht, wird beim Zerfall eines radioaktiven Kernes eine Energie von etwa 1 Million Elektronenvolt frei. Dieser ungeheure Unterschied zeigt, daß die in einem Kern wirksamen Kräfte bedeutend größer sind als die elektrischen Kräfte, welche die Elektronen an den Kern binden.

Welcher Art die sehr großen Kernkräfte sind, ist noch nicht genau bekannt, aber als fast sicher gilt, daß dabei die *Mesonen,* Teilchen, deren Masse zwischen der des Elektrons und der des Neutrons oder Protons liegt, von Bedeutung sind. Man nimmt an, daß die Mesonen zwischen den Neutronen und Protonen des Kerns schnell hin- und herfliegen und diese dadurch fest zusammengehalten werden. Die Untersuchung der Mesonen und der Kernkräfte ist der wichtigste Grund für den Bau so großer Maschinen, wie sie Elektronen-Synchrotone, Protonen-Synchrotone und Synchro-Zyklotrone (die vorhandenen Maschinen haben teilweise noch besondere Namen, z. B. das Bevatron und das Kosmatron. Anm. d. Übers.) darstellen. Man kann mit diesen Maschinen Protonen, Neutronen (auf dem Umweg über eine bestimmte Kernreaktion) und Elektronen bis zu Energien von mehreren hundert Millionen Elektronenvolt und mehr beschleunigen. Die beschleunigten Teilchen läßt man auf bestimmte Kernarten auftreffen und erhält so unter anderem Mesonen, die bei der Heftigkeit der Zusammenstöße aus den Neutronen und Protonen herausgeschlagen werden und sozusagen ins Freie gelangen, wo sie untersucht werden können.

Obgleich die Art der Bindung zwischen den im Kern befindlichen Teilchen noch sehr undurchsichtig ist, kann man glücklicherweise doch mit großer Genauigkeit voraussagen, wieviel Energie bei der Umwandlung instabiler Kerne frei wird. Die starke Bindung ist der Grund für die auftretenden großen Energiemengen, aber zur Berechnung der Umwandlungsenergie ist die Kenntnis der komplizierten Mesonenwechselwirkung in keiner Weise erforderlich. Die Genauigkeit der Voraussage ermöglicht Einsteins berühmte *Masse-Energie-Gleichung*, die vorhersagt, daß Masse in Energie verwandelt werden kann und uns außerdem genau angibt, wieviel Energie bei einer solchen Umwandlung entsteht. Emittiert ein instabiler Kern Strahlung, so hat der dabei entstehende stabile Kern etwas weniger Gewicht, oder mit anderen Worten, weniger *Masse* als der ursprüngliche Kern. *Die wenige verschwundene Masse wird in die überaus große Strahlungsenergie umgewandelt.* Hier haben wir ein einfaches Beispiel für Einsteins Prinzip — die Umwandlung von Masse in Energie —, das die Grundlage für das gesamte Gebiet der Atomenergie darstellt.

Die Gleichung Einsteins ist für das Gebiet der Atomenergie so grundlegend, daß wir ihre Grundlagen beherrschen sollten, auch wenn dies einige Fachausdrücke mehr und etwas Mathematik erfordert. Die eigentliche Gleichung

$$E = mc^2$$

ist, zum Glück für die von uns gesuchte Erklärung, sehr einfach, obgleich sie in Wirklichkeit das Ergebnis höchst tiefgehender, mit der Relativität und der Zeit als vierter Dimension zusammenhängender Betrachtungen darstellt. Wir können diese Betrachtungen ohne Einbuße an Genauigkeit weglassen und die Gleichung in ihrer einfachen, aber eleganten Form untersuchen. In Worten sagt diese Gleichung aus, daß die Energie E gleich der zweimal mit der Lichtgeschwindigkeit c, d. h. mit c-„Quadrat" multiplizierten Masse m ist. Dieser einfache arithmetische Vorgang sagt uns genau, wieviel Energie E an Stelle einer verschwundenen Masse m auftaucht, z. B. für den Fall, daß ein instabiler Kern Strahlung emittiert.

Benützt man die tatsächlichen in diese Gleichung eingehen-

den Zahlen, so wird die ungeheuere Größe der Kernenergie augenscheinlich. Die Größe wird wegen der hohen Lichtgeschwindigkeit c so bedeutend, c beträgt 3×10^{10} cm in der Sekunde, d. h. eine 3 mit zehn Nullen = 30 000 000 000. Diese Zahl mit sich selbst multipliziert, also quadriert, ergibt 9×10^{20}, oder eine 9 mit zwanzig Nullen, eine wirklich imposante Zahl, die wir nicht in der vollen Länge ausschreiben, sondern kurz und bequem mit 9×10^{20} bezeichnen.

Es ist nicht der Mühe wert, der Arithmetik nachzugehen, die im einzelnen notwendig ist, um diese großen Zahlen in besser vertraute Ausdrücke zu verwandeln, um so die Bedeutung der Gleichung $E = mc^2$ zu verstehen. Es ist einfach so, daß selbst das Verschwinden von wenig Masse durch das Erscheinen einer ungeheuer, kaum begreiflich großen Energiemenge offenkundig wird. Die von uns umrissene Arithmetik zeigt z. B., daß bei der Umwandlung von 1 Kilogramm Masse — was für ein Stoff verwendet wird, spielt keine Rolle — 25 Milliarden Kilowattstunden entstehen. Solch eine Energiemenge kann man sich kaum vorstellen; als Hilfe sei angegeben, daß es ungefähr die elektrische Energie ist, die eine Kleinstadt mit 23 000 Einwohnern innerhalb eines ganzen Jahres verbraucht. Die Vorstellung der Energie, die 1 Kilogramm Masse entspricht, wird erleichtert, wenn wir andere Einheiten verwenden. So liefert das Verschwinden dieses 1 Kilogramms Masse die gleiche Energiemenge, die man bei der Verbrennung von 2,8 Milliarden Litern Benzin oder 2,5 Millionen Tonnen Kohle erhält. Natürlich sagt uns die Gleichung $E = mc^2$ nicht, *wie* wir z. B. 1 Kilogramm Wasser in Energie verwandeln können. Sie stellt vielmehr ein Prinzip universeller Anwendbarkeit dar, das die Beziehung zwischen Masse und Energie, aber nicht den Vorgang der Umwandlung behandelt. Einsteins Theorie wurde vor etwa einem halben Jahrhundert entwickelt, und obwohl man ihre allgemeine Gültigkeit erkannte, konnte man sich damals die Erzeugung von Energie in großem Maßstab nicht vorstellen, einfach deshalb, weil man glaubte, ein geeigneter Vorgang wäre nicht realisierbar.

Benützt man Einsteins Gleichung in der eben beschriebenen Weise, aber in der Anwendung auf einzelne Atome, dann sagt sie uns genau, wieviel Energie bei der Umwandlung eines

Atoms in ein anderes frei wird. Erfolgt diese Umwandlung von selbst (spontan) wie z. B. beim Radium, so muß sie von einem schwereren Atom zu einem leichteren führen, sonst wäre ja keine in Energie verwandelbare Masse verfügbar. Die Gewichte aller Atome sind sehr genau gemessen worden, und man braucht nur das Gewicht eines Atoms mit dem eines anderen zu vergleichen, um festzustellen, welche Energie bei der Umwandlung des ersten Atoms in das zweite auftritt. Die instabilen Kerne, in Fig. 6 durch leere Kreise dargestellt, sind im Vergleich zu den anderen schwerer, und Umwandlungen von leeren zu ausgefüllten Kreisen, also zu größerer Stabilität, entsprechen einer Massenabnahme.

Die natürlichen Kernumwandlungen, wie der radioaktive Zerfall des Radiums, stellen nur solche Fälle dar, bei denen sich ein Atom in ein anderes der fast gleichen Größe umwandelt. Mit anderen Worten, unter Benützung der bereits definierten Fachausdrücke, bei natürlichen Umwandlungen ändern sich Massenzahl und Atomnummer nur um kleine Beträge, sagen wir um ein oder zwei Einheiten. Die während der Umwandlung emittierte Strahlung besteht nur aus einigen gut bekannten Arten. Diese Strahlungsarten bezeichnet man als Alpha-, Beta- und Gamma-Strahlen, sie sind schon seit 1900 bekannt, als viele ihrer Eigenschaften von den Curies untersucht wurden. Die *Alpha-Strahlen* bestehen aus Kernen des Heliumatoms He^4, die unter Benützung dessen, was wir über die Kernstruktur wissen, einfach durch die Aussage beschrieben werden können, daß jeder Kern zwei Neutronen und zwei Protonen enthält. Die *Beta-Strahlen* sind Elektronen hoher Geschwindigkeit, haben also, wie wir wissen, sehr wenig Masse und eine negative elektrische Ladung.

Die *Gamma-Strahlen* haben weder Masse noch Ladung und entsprechen den Röntgenstrahlen, nur daß sie eine kürzere Wellenlänge und daher eine größere Energie besitzen. Einige einfache Eigenschaften der drei Strahlungsarten zeigt Fig. 7.

Wir werden uns später noch mit den genaueren Eigenschaften dieser Strahlungsarten befassen, denn sie bestimmen den vielfachen Gebrauch der Radioisotope, die man in Kernreaktoren in großen Mengen erzeugen kann. Im Moment jedoch genügt es, wenn wir uns vergegenwärtigen, daß diese Strah-

lung die Energie wegführt, die Einsteins Gleichung für die Umwandlung eines instabilen Kernes in einen leichteren, stabileren voraussagt.

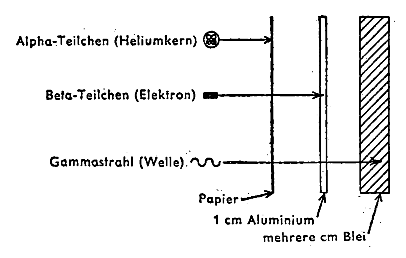


Fig. 7. Die Durchdringungskraft von Alpha-, Beta- und Gamma-Strahlen, dargestellt durch die Dicke des Materials, die nötig ist, um sie aufzuhalten.

Vom Menschen erzeugte Kernumwandlungen

Die eben diskutierten Kernumwandlungen betrafen spontane Umwandlungen instabiler Kerne, die immer mit einer Massenabnahme und der Emission von Strahlung verbunden sind. Man kann diesen Zerfall nicht beeinflussen, denn seine Geschwindigkeit ist eine unveränderliche Eigenschaft der betreffenden Kernstruktur und dabei stark von der verfügbaren Energie abhängig; im allgemeinen tritt die Umwandlung um so rascher ein, je größer die ausgestrahlte Energie ist. Instabilität und spontane Umwandlung zeigen, abgesehen von einigen unbedeutenden Ausnahmen, nur die schwersten der in der Natur vorhandenen Elemente.

Der englische Physiker Rutherford jedoch zeigte, daß man Atome auch künstlich von einer Art in eine andere umwandeln kann; durch diese sogenannte *künstliche Kernumwandlung* vergrößerten sich die Möglichkeiten der Veränderungen von Kernen ungeheuer. Es wurde möglich, im ganzen Bereich der Elemente, von Wasserstoff bis Uran, ein Element in ein anderes umzuwandeln, und man konnte sogar neue instabile Isotope erzeugen, die vorher in der Natur nicht gefunden wurden. Von irgendeinem gewünschten Element, z. B. C, Fe

oder Pb, das bis dahin als völlig stabil betrachtet wurde, konnte man Radioisotope herstellen.

Rutherford zeigte, daß durch Auftreffen eines Teilchens mit hoher Geschwindigkeit auf einen Kern dieser in einen anderen umgewandelt werden kann. Natürlich muß das zum Beschießen verwendete Teilchen sehr große Energie haben, weil es ja die Kernstruktur verändern soll, also entweder Protonen oder Neutronen hinzufügen oder entfernen muß, die durch die sehr starken Kernkräfte zusammengehalten werden. Rutherford benützte bei seinen bahnbrechenden Untersuchungen zum Bestrahlen der Kerne Alpha-Teilchen.

Die Alpha-Teilchen erhielt man beim Zerfall schwerer Elemente, wie z. B. Radium, das Alpha-Teilchen mit einer Energie von mehreren Millionen Elektronenvolt aussendet. Die historische, erstmals von Rutherford erzeugte Kernumwandlung zeigt Fig. 8. Die Entdeckung wurde durch die Beobachtung der bei der Umwandlung entstehenden energiereichen Protonen gemacht, die man auf einen Leuchtschirm auftreffen ließ, wo sie winzige Lichtblitze erzeugten.

Heute besitzt man bedeutend stärkere Quellen für die zum Beschießen verwendeten Teilchen, z. B. Zyklotrone oder die Neutronenstrahlen, die aus Kernreaktoren austreten. Schon in den dreißiger Jahren, also vor dem Bau von Kernreaktoren, gelang es mit Hilfe von Zyklotronen, Radioisotope in viel

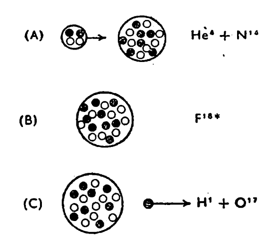


Fig. 8. Die erste künstliche, von Rutherford entdeckte Kernumwandlung, in der Stickstoff durch Beschuß mit Alpha-Teilchen in Sauerstoff umgewandelt wurde. Bei (A) trifft das Alpha-Teilchen auf den Stickstoffkern, in (B) wird der gebildete kurzlebige Fluorkern gezeigt und in (C) die Endprodukte, ein energiereiches Proton und ein Sauerstoffkern.

größerem Umfang herzustellen, als dies mit den natürlichen Quellen der Alpha-Teilchen möglich ist. Die heute in Kernreaktoren verfügbaren Neutronenintensitäten sind so groß, daß damit im wesentlichen die große Zahl und Menge der vielfach verwendeten Radioisotope ohne Schwierigkeiten erzeugt werden kann.

Einsteins Gleichung gilt auch für die künstlichen Kernumwandlungen, die man zur Erzeugung von Radioisotopen verwendet. Im allgemeinen wird die Gleichung bei der Herstellung von Radioisotopen, aber in umgekehrter Weise als bisher besprochen, angewendet. Die instabilen Isotope sind schwerer als die stabilen Isotope, in die sie zerfallen. Die Erzeugung der ersteren aus den letzteren erfordert also entsprechend der Zunahme der Masse eine Umwandlung von Energie in Masse. Diese Energie entstammt der Bewegungsenergie des zum Bestrahlen verwendeten Teilchens. Die Gleichung von Einstein liefert uns bei Kenntnis der Massen der beteiligten Atome genau die für den Beschuß notwendige Energie. Wie wir auf Grund unserer früheren Erörterungen von vornherein annehmen würden, sind die benötigten Energien von der Größenordnung Millionen Elektronenvolt, weil es sich um die Änderung von Kernstrukturen handelt.

Bei allen Kernumwandlungen, gleich, ob diese durch Bestrahlung in einem Zyklotron oder durch die beim natürlichen radioaktiven Zerfall, z. B. von Uran, frei werdenden Teilchen erzeugt werden, ist von großer praktischer Wichtigkeit, daß die gesamte bei einer Umwandlung auftretende Energiemenge sehr klein ist, obgleich sie im Rahmen eines einzelnen Kernes betrachtet, im allgemeinen groß ist. Die Ursache ist, daß zwar in einem Stück radioaktiver Substanz pro Sekunde Millionen von Atomen zerfallen können, die Zahl der Zerfälle aber doch nur ein winziger Bruchteil der insgesamt vorhandenen Atome ist, weil deren Zahl eben viel größer ist. Ähnlich ist, wenn man die von einem Zyklotron erzeugten Teilchen auf ein Stück Materie treffen läßt, die Zahl der getroffenen und umgewandelten Atome nur ein äußerst winziger Bruchteil der insgesamt vorhandenen Zahl von Atomen.

Diese Tatsachen folgen aus der großen Zahl von Atomen, die sich in der Materie befinden, und ihren äußerst kleinen

Kernen, die zur Erzeugung einer Umwandlung von einem Teilchen getroffen werden müssen. Ein Gramm Radium z. B., das ungefähr Erbsengröße hat, enthält 3×10^{21} Atome. Obgleich jede Sekunde 40 Milliarden (4×10^{10}) Radiumkerne von selbst zerfallen, dauert es doch 1600 Jahre, bis sich die Hälfte dieses Radiumstückchens umgewandelt hat! Die Leistung, die das Gramm Radium erzeugt, ist deshalb sehr klein, nämlich ein hundertstel Watt, oder ein Tausendstel der von einer kleinen 10-Watt-Lampe verbrauchten Leistung.

Die Atome sind, wie man aus der in der Materie vorhandenen großen Anzahl schließen kann, sehr klein und ihre Kerne noch viel kleiner. Atome haben einen Durchmesser von der Größenordnung 10^{-8} (oder ein hundertmillionstel) cm, die Kerne aber sind noch etwa zehntausendmal kleiner, also 10^{-12} (ein billionstel) cm. Obgleich man sich diese äußerst kleinen Abmessungen unmöglich vorstellen kann, sieht man nun ein, warum ein zum Beschießen verwendeter Strahl mit Millionen von Teilchen pro Sekunde nur einen kleinen Teil des beschossenen Materials umwandelt.

Hauptsächlich wegen der großen Zahl von Atomen ist es äußerst schwierig, *große* Effekte hervorzurufen, also einen bedeutenden Bruchteil des Materials künstlich umzuwandeln, oder größere Energiemengen bei dem spontanen Zerfall zu erhalten. Die in den dreißiger Jahren mit Hilfe des Zyklotrons erzeugten Kernumwandlungen waren für die Klärung der Kernstruktur sehr wichtig, völlig unerheblich aber waren sie im Hinblick auf die Zahl von Kernumwandlungen, die nötig ist, um einen großen, praktisch verwertbaren Effekt zu erhalten.

Damals stellten einige Wissenschaftler Betrachtungen über die großen Energiemengen an, die man gewinnen könnte, wenn es jemals gelänge, eine große Zahl von Atomen umzuwandeln. Man kannte aber keine Methoden, welche die Umwandlung einer so ungeheueren Zahl von Atomen ermöglicht hätten. Diese Betrachtungen wurden als wissenschaftliche Träumereien angesehen, die von vielen Autoritäten, auch von Rutherford selbst, wie sein Ausspruch am Anfang des Kapitels zeigt, herabgesetzt wurden. Niemand vermutete, daß man einen Vorgang finden würde, der das Bild völlig verändert,

indem er die Möglichkeit bietet, Material nicht nur kilo-, sondern tonnenweise umzuwandeln und nahezu unbegrenzte Energiemengen zu gewinnen. Natürlich handelt es sich bei dieser Entdeckung um die Kernspaltung, deren Existenz, obwohl sie uns heute so selbstverständlich geworden ist, in den zwanziger und dreißiger Jahren nicht im geringsten vermutet wurde, zu einer Zeit, als Kernumwandlungen nur in kleinem Maßstab und mit mühsamer Bestrahlung möglich waren.

Kernspaltung

Während der Zeit von 1925 bis 1935 erreichte man viele Kernumwandlungen durch Bestrahlen mit Protonen, Alpha-Teilchen und Gamma-Strahlen, die man gewöhnlich mit Teilchenbeschleunigern, hauptsächlich dem kurz vorher entwickelten Zyklotron, erzeugte. Nach seiner Entdeckung im Jahre 1932 wurde das Neutron ein Geschoß höchster Wichtigkeit. Der Grund für die große Wirksamkeit des Neutrons liegt darin, daß es eine verhältnismäßig große Masse hat und keine elektrische Ladung trägt, also deshalb das um den Atomkern befindliche elektrische Feld leicht durchdringen kann. Auf diese Weise können sogar Neutronen, die sich sehr langsam bewegen, in den Kern eindringen und diesem genügend Energie zuführen, um eine Kernumwandlung zu bewirken. Es stellte sich heraus, daß Neutronen für die Herstellung von Radioisotopen besonders wirksam sind, und man benützt sie deshalb für fast jedes Element.

Als man Uran, das schwerste bekannte Element, mit Neutronen bestrahlte, dachte man zuerst, daß man auf diese Weise neue Elemente erzeugt habe, die schwerer als Uran sind. Das komplizierte chemische Verhalten der entstandenen Produkte führte jedoch zwei deutsche Wissenschaftler, Hahn und Strassmann, im Dezember 1938 zur richtigen Erklärung. Sie stellten auf Grund der chemischen Eigenschaften der durch die Neutronenbestrahlung entstandenen Produkte fest, daß es sich nicht um neue Elemente, die schwerer als Uran sind, handelt, sondern um Isotope wohlbekannter Elemente, die ungefähr halb so schwer wie Uran sind. So hatten sie gezeigt, daß der Uran-

kern nach der Absorption eines langsamen Neutrons in zwei ungefähr gleich schwere Teile zerbrechen kann — ein Vorgang, der bald als *Kernspaltung* bekannt wurde.

Bis zu der Entdeckung von Hahn und Strassmann waren die Änderungen bei allen Kernumwandlungen relativ geringfügig, die Änderung des Atomgewichtes oder der Atomnummer betrug nur ein oder zwei Einheiten. Hier aber hatte man es mit einer sehr verschiedenen Art der Umwandlung zu tun, bei der das Atomgewicht und die Atomnummer bedeutend verändert wurden, nämlich ungefähr durch zwei geteilt. Da alle Atomgewichte ziemlich gut bekannt waren, ergab sich aus dem Vergleich der Gewichte des Urans und der beiden bei der Spaltung entstandenen Kerne sofort, daß bei diesem Vorgang viel Masse verschwinden mußte. Die Gewichtsänderung war etwa hundertmal größer als bei den gewöhnlichen Kernreaktionen. Also mußte gemäß Einsteins Gleichung zwangsläufig hundertmal soviel Energie frei werden wie üblich, es sind tatsächlich etwa 200 Millionen Elektronenvolt.

Sobald die revolutionäre Entdeckung von Hahn und Strassmann der wissenschaftlichen Welt bekanntgemacht wurde, führte man sogleich Experimente durch, welche die vorausgesagte Freisetzung einer großen Energiemenge bestätigten. Die Energie erscheint in Form von Bewegungsenergie, d. h. die beiden Hälften, in die der Urankern zerbricht, bewegen sich mit ungeheuerer Geschwindigkeit auseinander. Innerhalb einiger Monate nach der Entdeckung waren die meisten grundsätzlichen Eigenschaften der Spaltung bekannt und wurden ohne Einschränkung veröffentlicht, denn 1939 gab es in der Kernphysik noch keine Geheimhaltung.

Nun wollen wir uns etwas näher befassen mit dieser explosionsartigen Erscheinung der Spaltung, die durch die Absorption eines langsamen Neutrons ausgelöst wird und welche die praktische Umwandlung von Masse in Energie in den Bereich des Möglichen bringen sollte. Absorbiert irgendein Kern ein Neutron, so nimmt er etwas Energie auf, die als Wärmeenergie betrachtet werden kann, genau wie sich ein Holzklotz etwas erwärmen würde, wenn man ihn als Kugelfang verwenden würde. Das Verhalten des Kerns, nachdem er etwas Energie aufgenommen hat, gleicht aber mehr dem Verhalten eines

Flüssigkeitstropfens als dem eines Holzklotzes. Tatsächlich werden viele Eigenschaften des Kerns aus den gut bekannten Eigenschaften der Flüssigkeiten berechnet; man spricht so von dem *Tröpfchenmodell* des Kerns.

Wenn ein Flüssigkeitstropfen erhitzt wird, beginnt er heftig zu schwingen, Wellen bewegen sich um die ihn begrenzende Oberfläche, und Teile von ihm können verdunsten oder verdampfen. Auf die gleiche Weise verursacht die in einem Kern absorbierte Energie Schwingungen der Kernmaterie, die denen eines Flüssigkeitstropfens ähnlich sind. Bei einem schweren Kern, z. B. Uran, können die Schwingungen so heftig und die Anordnung so instabil werden, daß die Wahrscheinlichkeit eines Auseinanderbrechens in zwei ungefähr gleiche Tröpfchen, wie es Fig. 9 zeigt, groß wird. Dieses Bild, das den Eindruck einer groben Analogie erweckt, liefert eine überraschend genaue Beschreibung des Vorganges der Kernspaltung. Es sagt z. B. voraus, daß die zwei Teile des Urankerns, während sie sich voneinander wegbewegen, so heftig schwingen, daß kleine Teilchen der Kernmaterie wegfliegen können. Diese kleinen Teilchen sind gewöhnlich Neutronen, die, wie wir später sehen werden, für die Erzeugung der Kettenreaktion von größter Bedeutung sind.

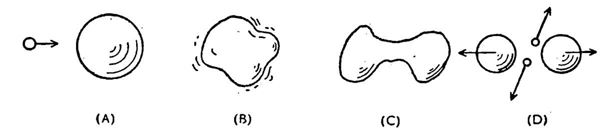


Fig. 9. Das Tröpfchenmodell des Urankernes bei der Kernspaltung. (A) Das Neutron nähert sich dem Kern, (B) der entstandene Kern beginnt zu schwingen; (C) der Kern beginnt zu zerbrechen; (D) die durch das Zerbrechen entstandenen Spaltbruchstücke und Neutronen fliegen auseinander.

Bedeutung des U^{235} und U^{238} bei der Spaltung

Bei der Entdeckung der Spaltung und den ersten zugehörigen Experimenten benützte man das gewöhnliche Uran, wie es in der Natur vorkommt. Es besteht fast vollständig aus U^{238}

mit etwas weniger als einem Prozent U^{235}. Der betrachtete grundsätzliche Vorgang der Spaltung ermöglicht uns, einzusehen, warum nur das U^{235} leicht spaltbar ist. Um den Vorgang der Spaltung in Gang zu bringen, ist es offensichtlich notwendig, so viel Energie zuzuführen, daß die Schwingungen heftig genug werden, um die ausgeprägte Verformung hervorzurufen, die zum Zerreißen führt. Eine einfache Betrachtung der Kernstruktur zeigt, warum nach der Absorption eines Neutrons genügend energiereiche, zur Spaltung führende Schwingungen bei U^{235} viel wahrscheinlicher sind als bei U^{238}.

Es ist eine gut fundierte Eigenschaft der Kerne, daß die einzelnen Teilchen ein starkes Bestreben haben, paarweise vorzukommen; es herrscht starke Bindung zwischen zwei Neutronen und ebenso zwischen zwei Protonen. So ist der Heliumkern mit einem Paar Neutronen und einem Paar Protonen unter allen Kernen der stabilste; als einziger Kern absorbiert er kein anderes Neutron. Ähnlich ist Sauerstoff, $_8O^{16}$ mit vier Neutronenpaaren und vier Protonenpaaren äußerst stabil, dagegen ist das künstlich herstellbare $_7N^{17}$-Isotop höchst instabil und zerfällt spontan in $_8O^{16}$. Dieser radioaktive Zerfall geht schnell vor sich, entsprechend der großen Energiemenge, die dabei frei wird. Das Isotop $_{92}U^{238}$ besteht nur aus Protonen- und Neutronenpaaren, 46 von den ersteren und 73 von den letzteren. Das Isotop $_{92}U^{235}$ hat zwar die gleiche Atomnummer (also Anzahl von Protonen), aber eine ungerade Anzahl, nämlich 143 (71 Paare plus 1) Neutronen und ist daher weniger stabil. Dies sind alles Beispiele der grundsätzlichen Kerneigenschaft, daß unpaarigen Teilchen eine größere Masse und Instabilität entspricht.

Wir können in der Untersuchung der energetischen Vorgänge bei der Spaltung einen Schritt weitergehen, obgleich die Betrachtungen dabei etwas subtiler werden. Der Kern, der *nach* der Absorption eines Neutrons durch einen U^{235}-Kern und *vor* der Spaltung entsteht, ist ein U^{236}-Kern, der nur Paare (46 Protonenpaare und 72 Neutronenpaare) enthält, also in seinem *normalen* Zustand sehr stabil sein würde. Aber bei der Bildung unseres U^{236}-Kerns wurde ja einem bereits instabilen, also energiereichen U^{235}-Kern Energie zugeführt, und der U^{236}-Kern müßte deshalb sehr viel Energie emittieren, um in

seinen normalen Zustand, also den ohne überschüssige Energie, überzugehen. Der Übergang des U^{236}-Kerns in den normalen Zustand erfolgt mit einer geringen Wahrscheinlichkeit durch Emission von Gammastrahlung; der dabei entstehende normale U^{236}-Kern kann vor seinem weiteren Zerfall Millionen von Jahren existieren. Der bei weitem wahrscheinlichere Vorgang aber ist, daß die durch die überschüssige Energie entstehenden Schwingungen des U^{236}-Kerns zu dessen Spaltung führen, bevor der Kern seine Energie durch andere Prozesse verlieren kann.

Gerade umgekehrt ist die Situation bei U^{238}, hier fügen wir einem stabilen Kern ein Neutron zu und bilden so U^{239}, das in seinem normalen Zustand nicht stabil ist. Weil der so gebildete Kern beim Übergang zu normalem U^{239} nicht viel Energie abgeben würde, hat er auch wenig Energie für die starken Schwingungen verfügbar, die zu einer Spaltung führen könnten. Normales U^{239} existiert nur einige Minuten, bevor es wegen seiner instabilen Natur zerfällt.

Die vorausgesagte größere Spaltbarkeit des U^{235} im Vergleich zu U^{238} wurde durch Experimente bald bestätigt. Wie wir später sehen werden, führte dies zu der Erkenntnis, daß zur Herstellung einer Uran-Atombombe die Abtrennung des U^{235}-Isotops notwendig ist. Hauptsächlich wegen dieser gigantischen industriellen Aufgabe wurden für das Atomprojekt während des Krieges zwei Milliarden Dollar ausgegeben.

Die Produkte der Spaltung — Energie, Bruchstücke und Neutronen

Der Vorgang der Spaltung, dessen Grundlagen wir gerade behandelten, liefert drei Hauptprodukte, die alle von großer praktischer Bedeutung sind. Es sind 1. die Energie, 2. die Bruchstücke und 3. die Neutronen. Die freigesetzte Energiemenge wird direkt aus der Gewichtsdifferenz berechnet, die zwischen einem Uranatom plus einem Neutron und den Bruchstücken, in die der Urankern zerbricht, besteht. Der Charakter der Bruchstücke variiert, weil der Kern nie in zwei genau gleiche Hälften zerbricht und so die Bruchstücke mehreren

Dutzend verschiedener Elemente entsprechen. Die frei werdende Energie beträgt aber immer ungefähr 200 Millionen Elektronenvolt, also sehr viel mehr als bei den üblichen Kernreaktionen, wo etwa 1 Million Elektronenvolt frei wird, und ungeheuer viel mehr als bei chemischen Reaktionen, wo Energien von der Größenordnung einiger Elektronenvolt frei werden.

Trotz des sehr großen Energiegewinnes bei der Spaltung verschwindet doch nur ein kleiner Bruchteil der Masse des Urankerns. Der Bruchteil, um den die Masse des Urankerns abnimmt, ist nur ein Teil von Tausend, d. h. 0,1%. Durch Vergleich mit den bereits angegebenen Zahlen für die vollständige Umwandlung von Masse in Energie erhalten wir die bei der Spaltung frei werdende Energie einfach, wenn wir durch tausend teilen. Es ergibt sich, daß die Spaltung aller Atome von 1 Kilogramm Uran eine Energie von 25 Millionen Kilowattstunden liefert, dies entspricht der Energie, die bei der Verbrennung von 2,8 Millionen Litern Benzin oder 2500 Tonnen Kohle entsteht. Diese Energie erscheint zuerst als Bewegungsenergie, oder *kinetische Energie*, der auseinanderfliegenden Bruchstücke. Die sich schnell bewegenden Bruchstücke stoßen mit Uranatomen zusammen, wobei sie schnell abgebremst werden und ihre kinetische Energie in Wärme verwandelt wird, die eine Temperaturerhöhung des Urans verursacht. Der wirtschaftliche Gebrauch dieser Wärmeenergie für die Erzeugung elektrischer oder mechanischer Energie ist eine der bedeutendsten praktischen Aufgaben der Atomenergieindustrie; wir wollen sie aber erst später behandeln.

Die bei der Spaltung entstehenden Bruchstücke sind gewöhnlich sehr instabil, weil sie einen größeren Bruchteil Neutronen enthalten als die stabilen Elemente mit gleichem Gewicht. Dieses Ergebnis kann aus Fig. 6 leicht vorweggenommen werden. Bei symmetrischer Teilung des U^{236} würden sich zwei Atome mit der Atomnummer 46 (Palladium) und der Massenzahl 118 ergeben, von denen jedes 72 Neutronen enthält, also viel mehr als die 57 Neutronen, die sich aus den ausgefüllten Kreisen in Fig. 6 ergeben. Die Bruchstücke sind also stark radioaktiv, d. h. sie sind *Radioisotope* und gehen in stabile Formen dadurch über, daß jedes in einer Kette von Zerfällen mehrere Beta-Teilchen emittiert.

Die starke Strahlung der bei jeder Kettenreaktion entstehenden Bruchstücke erfordert den Bau großer *Strahlungsabschirmungen* rund um die Kernreaktoren. Die radioaktiven Bruchstücke erzeugen einerseits die Gefahr des *radioaktiven Niederschlages* nach Atombombenexplosionen, andererseits sind sie auf zahlreichen Gebieten der Forschung äußerst nützlich.

Das dritte wichtige Produkt der Spaltung sind die Neutronen. Während die Bruchstücke sich auseinanderbewegen, sind sie infolge ihres großen Neutronenüberschusses sehr instabil, und noch bevor sie abgebremst werden, und lange vor Beginn der Beta-Teilchen-Emission, „splittern" einige Neutronen von den Bruchstücken weg. Die Emission erfolgt so schnell, daß sie praktisch ein Teil der Spaltung selbst ist, ein Kennzeichen für die Heftigkeit der Schwingungen, die zur Spaltung führen. Während der Spaltung des U^{235}-Kerns werden so im Durchschnitt 2,5 Neutronen emittiert. Die bei der Spaltung emittierten Neutronen ermöglichen die Kettenreaktion und sind sehr wichtig für die Herstellung von Radioisotopen und die Grundlagenforschung.

Wir werden bald untersuchen, wie die Kettenreaktion, die eine Vervielfachung des Spaltungsvorganges liefert, erreicht wird. Obwohl die Kettenreaktion, in der Art, wie sie in vielen Reaktoren vor sich geht, kompliziert ist, wird sich zeigen, daß die Grundprodukte immer noch Energie, Bruchstücke und Neutronen sind. Bevor wir uns weiter mit den Anwendungen der Spaltung beschäftigen, wenden wir uns jetzt einem Prozeß zu, der in vielen Punkten gerade umgekehrt verläuft, obgleich auch mit ihm Energie gewonnen werden soll — es handelt sich um den vieldiskutierten Vorgang der Fusion.

Fusion

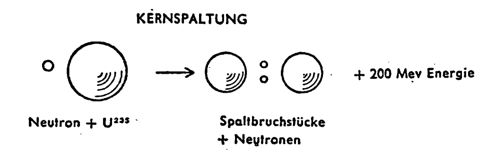
Den Vorgang der *Fusion* (Kernverschmelzung) können wir mit Hilfe der behandelten Grundlagen der Kernstruktur und der Umwandlung von Masse in Energie ziemlich leicht verstehen. Im Prinzip handelt es sich wie bei der Spaltung um die Freisetzung großer Energiemengen aus Kernen, aber der benützte Mechanismus ist ein völlig anderer. Bei der Spaltung

wiegen die entstandenen Bruchstücke zusammen weniger als der ursprüngliche Urankern plus einem Neutron, und diese verschwundene Masse erscheint als Energie, deren Größe die Gleichung von Einstein liefert.

In der Tat wird bei jeder Kernreaktion Energie frei, wenn die Masse aller Produkte nach der Reaktion geringer ist als vorher. Die sehr schweren Elemente, wie z. B. Uran und Plutonium, sind schwerer als die bei der Spaltung entstehenden Atome zusammen, wegen dieser *Abnahme* von Masse wird bei diesem Vorgang immer Energie frei. Wenn die leichtesten Elemente, wie Wasserstoff und Lithium, durch das Zerbrechen größerer Atome gebildet werden, so erfolgt bei dieser Reaktion eine *Zunahme* der gesamten Masse. Wenn z. B. Helium in zwei Atome schweren Wasserstoff, also Deuterium, von denen jedes ein Proton und ein Neutron enthält, zerlegt werden soll, so müßte man bei diesem Prozeß Energie *hinzufügen,* weil die zwei Deuteriumatome mehr wiegen als ein Heliumatom. Wenn wir bei Reaktionen leichter Atome also Energie *gewinnen* wollen, müssen wir den umgekehrten Vorgang ausführen, d. h. leichte Atome miteinander *verschmelzen.*

Bei der Fusion verbinden sich also sehr leichte Atome zu einem schwereren, das weniger wiegt als die leichten Atome zusammen. Die bei der Fusion leichter Atome freigesetzte Energie ist, bezogen auf das Gewicht der beteiligten Kerne, größer als bei der Spaltung von schwereren Atomen. Bei der Fusion von zwei Deuteriumkernen (Deuteronen) zu einem Heliumkern, d. h. einem Alpha-Teilchen, werden 24 Millionen Elektronenvolt Energie frei (Fig. 10); das ist, bezogen auf einen Kern, viel weniger als die bei der Spaltung eines Urankerns freigesetzten 200 Millionen Elektronenvolt. Weil aber Deuterium im Vergleich zu Uran sehr leicht ist (ungefähr 1 Prozent), ist die bei der Fusion von *1 Kilogramm* schwerem Wasserstoff freigesetzte Energiemenge etwa siebenmal so groß wie bei der Spaltung von *1 Kilogramm* Uran. Obgleich der Energiegewinn sowohl bei der Fusion als auch bei der Spaltung auf dem Verschwinden von Masse beruht, ist der Mechanismus zum Erreichen dieser Kernumwandlungen für beide Reaktionen wesentlich verschieden. Der Grund für diesen Unterschied, der die Durchführung der Fusionsreaktion

äußerst schwierig macht, ist relativ einfach. Er ergibt sich aus der Tatsache, daß ein Neutron, weil es keine elektrische Ladung hat, das den Urankern umgebende elektrische Feld leicht durchdringen und eine Spaltung hervorrufen kann. Wollen wir dagegen die Fusion zweier Wasserstoffkerne erreichen, so ist das wegen der elektrischen Ladung, die jeder Kern trägt, sehr schwierig. Weil sich elektrische Ladungen gleichen Vorzeichens gegenseitig abstoßen, müssen die beiden Wasser-



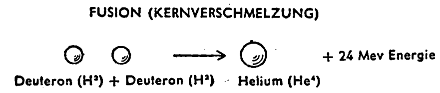


Fig. 10. Der Vergleich der Vorgänge, die der Kernspaltung und der Fusion zugrunde liegen.

stoffkerne mit so großer Heftigkeit zusammenstoßen, daß die elektrische Abstoßung überwunden wird, dann erst kann die Fusion stattfinden. Die um die Kerne kreisenden Elektronen können bei diesen Betrachtungen vernachlässigt werden, weil sie bei so heftigen Bewegungen von den Kernen abgestreift werden.

Die einzige Methode, Wasserstoffatome heftig genug zusammenstoßen zu lassen, besteht darin, sie in schnelle Bewegung zu setzen. Der einzige Weg aber, eine große Zahl von Atomen in schnelle Bewegung zu setzen, besteht darin, sie zu erhitzen. Reaktionen dieser Art nennt man *thermonuklear,* das sind also durch die *thermische* oder die Wärmebewegung der Atome in Gang gebrachte Reaktionen. Die erforderliche Temperatur liegt nicht im üblichen Bereich, es sind Temperaturen von 10 bis 100 Millionen Grad notwendig, um eine genügende Zahl von Reaktionen je Zeiteinheit zu erreichen. Diese Temperaturen sind so viel höher als die bei sonstigen

Prozessen bekannten, daß man sich eine Methode zu ihrer Erzeugung schwer vorstellen kann. Sogar die Temperatur der Sonnenoberfläche ist nur etwa 5500° Celsius und daher für den Ablauf thermonuklearer Reaktionen viel zu gering. Die Temperatur im Innern der Sonne ist natürlich viel höher, gut über 1 000 000°, und es ist fast sicher, daß die von der Sonne abgestrahlte Energie aus thermonuklearen Reaktionen in ihrem Innern herrührt.

Bis jetzt ist ein einziger Weg bekannt, auf dem die extrem hohen, für thermonukleare Reaktionen notwendigen Temperaturen auf der Erde erreicht wurden: die Explosion einer Atombombe. Wir befassen uns hier nicht im einzelnen mit der Explosion von Bomben, aber die Wasserstoffbombe zeigt das Prinzip der Fusionsreaktion sehr gut. Die H-Bombe, in der die thermonukleare Reaktion vor sich geht, erreicht die hohe Temperatur durch die Explosion einer Atom- oder Spaltungsbombe; die dabei auftretende Wärmeenergie erhitzt das Material der H-Bombe und bringt so die Fusionsreaktion in Gang.

Unser Ziel bestand vorläufig nur in einer Erklärung der Grundlagen der Fusion, unter Verwendung der bereits behandelten Grundbegriffe der Kernstruktur und der Freisetzung von Energie. Nach der Betrachtung der Methoden, die für die praktische Energiegewinnung aus der Spaltung gebraucht werden, wollen wir uns kurz mit den Unternehmungen befassen, die eine kontrollierte, also nicht-explosive Freisetzung von Fusionsenergie zum Ziel haben. Dieses bisher noch nicht gelöste Problem wird in Kapitel 9 behandelt. Es wurde absichtlich an den Schluß der Ausführungen über die Anwendung der Atomenergie im Frieden gestellt, weil es wegen seiner Ungelöstheit eindeutig in den Bereich des Zukünftigen verwiesen werden sollte und die Behandlung der gegenwärtigen, tatsächlichen Gewinnung von Atomenergie aus der Spaltung nicht beeinträchtigen sollte.

III

DIE KETTENREAKTION

Am 2. Dezember 1942 erreichte der Mensch hier die erste sich selbst erhaltende Kettenreaktion und leitete damit die kontrollierte Freisetzung von Kernenergie ein.

Gedenktafel am Fußballstadion der Universität von Chikago

Wir haben gesehen, warum die Umwandlung eines Elementes in ein anderes ein tiefgreifender Vorgang ist, der mit einer Veränderung der Kerne verbunden ist, also nicht nur mit einer Änderung der Anordnung der äußersten Elektronen eines Atoms, wie dies für chemische Reaktionen charakteristisch ist. Kernreaktionen erzeugen oder erfordern Energiemengen, die im Vergleich zu chemischen, also atomaren Reaktionen groß sind. Die typischen auftretenden Energien sind bei Kernreaktionen etwa eine Million mal größer als bei chemischen. Bei einer besonderen Kernreaktion, der Spaltung, ist die auftretende Energie noch größer, etwa hundertmal so groß wie bei gewöhnlichen Kernreaktionen. Von der Masse der Teilchen vor und nach einer Kernreaktion ist es abhängig, ob dabei insgesamt Energie aufgewendet werden muß oder gewonnen wird. Sind die Endprodukte leichter als die Ausgangsprodukte, so ist Masse verschwunden, und es muß eine der Einsteinschen Gleichung entsprechende Energiemenge auftreten.

Die Notwendigkeit einer Kettenreaktion

Es ist charakteristisch für Kernumwandlungen, daß sie schwer zu erzeugen sind. Obgleich die Energie *je Atom*, das an einer Umwandlung teilnimmt, sehr groß ist, ist die Gewinnung makroskopischer Energiemengen, d. h. die Umwandlung

eines beträchtlichen Bruchteils der in einem Stück Materie enthaltenen Atome, äußerst schwierig. Wenn ein Teilchenstrahl, wie er z. B. in einem Zyklotron hergestellt wird, durch Materie tritt, so ist die Chance, daß der Kern eines Atoms getroffen wird, und das ist ja für eine Umwandlung erforderlich, sehr klein. Das grundsätzliche Problem ist, wie man einen einigermaßen großen Teil der Atome zur Umwandlung bringen kann.

Es ist uns also, ebenso wie den Wissenschaftlern zu Beginn der dreißiger Jahre, klar, daß irgendeine Weiterentwicklung, eine Entdeckung, notwendig war, um die Ausbreitung der Umwandlungen über die ganze Materialmenge zu erreichen. Die Umwandlung eines bestimmten Kernes muß nicht nur Energie liefern, sondern auch auf irgendeine Weise die Umwandlung anderer Kerne bewirken. Diese Art der Umwandlung, die sich selbst von Atom zu Atom ausbreitet, ist auf dem Gebiet der Chemie eine gut bekannte Erscheinung, und man bezeichnet dort eine sich selbst fortpflanzende Reaktion als *Kettenreaktion.* Eine Kettenreaktion, welche die Fortpflanzung einer chemischen Reaktion bewirkt, beruht auf einer Wechselwirkung mehrerer Atome, bei der eine chemische Verbindung gebildet, verändert oder abgebaut wird und gleichzeitig eine kleine Energiemenge frei wird. Wird bei einer bestimmten Reaktion Energie frei und werden außerdem die benachbarten Atome auf irgendeine Weise so beeinflußt, daß sie in der gleichen Weise reagieren, dann besteht die Möglichkeit, daß sich die Reaktion ausbreiten kann. Ist die Ausbreitung genügend schnell, so kann eine rasche Zunahme der Intensität erfolgen und auf diese Weise aus der anfänglichen Reaktion einiger Atome die Entwicklung einer großen Energiemenge resultieren.

Ein eindrucksvolles Beispiel für diese Art der Ausbreitung einer Reaktion, also eine chemische Kettenreaktion, bietet die bei der Detonation eines Sprengstoffes stattfindende chemische Umwandlung. Hier erzeugen die ersten miteinander reagierenden Atome Wärmeenergie, welche die Bewegungsenergie der benachbarten Atome, und damit die Wahrscheinlichkeit einer chemischen Reaktion zwischen diesen, erhöht. Die Wahrscheinlichkeit erhöht sich einfach deshalb, weil die Atome öfters zusammenstoßen und daher eine größere Chance haben,

miteinander zu reagieren. Auf diese Art breitet sich die Reaktion so schnell im ganzen Material aus, daß eine starke Explosion entsteht.

Die Spaltkettenreaktion

Bezüglich der Kernumwandlungen wäre die gleiche Art der Kettenreaktion möglich gewesen, wenn man eine Reaktion gekannt hätte, bei der die Kernenergie auf eine solche Weise frei wird, daß sie weitere Kernumwandlungen bewirkt. Obgleich eine *Kernkettenreaktion* prinzipiell einfach erscheinen könnte, war viele Jahre keine Kernreaktion bekannt, welche die Eigenschaft der Selbstfortpflanzung zeigte. Trotz eifriger Suche zeigte sich kein Weg, der es ermöglicht hätte, von der Umwandlung eines winzigen Bruchteils der Kerne zu einer sich selbst fortpflanzenden Kernreaktion zu gelangen und die im Kern verschlossenen, ungeheuren Energiemengen in großem Maßstab freizusetzen.

Doch gerade als die Möglichkeit einer Freisetzung der Kernenergie in weiter Ferne zu liegen schien, wurde die völlig unerwartete Reaktion der Kernspaltung entdeckt. Bei der Spaltung trat genau der Vorgang auf, den man für die Fortpflanzung der Reaktion brauchte. In der Tat war, sobald die Entdeckung der Spaltung bekannt wurde, für die Wissenschaftler in der ganzen Welt klar, daß endlich der Auslösemechanismus für eine Kernkettenreaktion mit allen ihren großen Möglichkeiten zur Verfügung stand. Während es noch nicht offensichtlich war, daß viele praktische Schwierigkeiten überwunden werden konnten, hatten doch die Aussichten für einen möglichen Erfolg um vieles zugenommen.

Die einfachen, schon behandelten Eigenschaften der Kernspaltung zeigen, warum sie so einzigartig geeignet ist, eine Kettenreaktion auszulösen. Ein Neutron, das von einem Urankern absorbiert wird, erzeugt eine große Energiemenge, 200 Millionen Elektronenvolt, und verursacht — was ungeheuer wichtig ist — die Emission mehrerer Neutronen im Verlauf der Spaltung. „Im Prinzip", das ist der glückliche Zustand, in dem wir praktische Schwierigkeiten vergessen können, beginnen wir mit einem Neutron und ohne freie Energie,

und nach der Spaltung eines Urankerns haben wir eine große Energiemenge und ungefähr zwei oder drei Neutronen.

Gerade weil die Neutronen die Geschosse sind, welche die Spaltung erzeugen, ist es klar, daß der Prozeß die Eigenschaft der Selbstfortpflanzung in starkem Maße aufweist; die Zahl der Neutronen wird um mehrere hundert Prozent vermehrt, durch eine Reaktion, für deren gewünschte Erzeugung nur eines dieser Neutronen verbraucht wird. So erscheint es „im Prinzip" lächerlich einfach, eine sich selbst fortpflanzende Reaktion großer Ausdehnung zu erreichen, aber natürlich stehen wir „in der Praxis" unglücklicherweise allen praktischen Schwierigkeiten gegenüber.

Vor der Behandlung der praktischen Ausführung — es waren drei Jahre harter Arbeit notwendig, bis der Entdeckung der Spaltung eine erfolgreiche Kettenreaktion folgte — scheint es der Mühe wert, in etwas ideeller Weise die einfachen Eigenschaften einer Kettenreaktion zu betrachten. Es sind diese einfachen mathematischen Eigenschaften der Kettenreaktion, die unabhängig von tatsächlichen physikalischen Einzelheiten und praktischen Schwierigkeiten, die Aussicht auf eine erfolgreiche Kettenreaktion fast zu gut erscheinen lassen, um wahr zu sein. Als Beispiel für die zurückhaltende Art der ersten flüchtigen Betrachtungen dieser Möglichkeiten ist es interessant, sich zu erinnern, daß einige Wissenschaftler damals die Ansicht äußerten, daß eine Kettenreaktion unmöglich sein würde. Sie kamen zu diesem Schluß auf Grund der Meinung, daß eine Kettenreaktion, wenn sie wirklich möglich wäre, schon *irgendwo* auf der Erdoberfläche natürlicherweise stattgefunden und verheerende Folgen gehabt hätte. Diese Männer hielten es einfach nicht für möglich, daß die Freisetzung der Kernenergie in so großem, kaum vorstellbarem Maßstab mit den begrenzten Kräften der Menschen ausgeführt werden könnte.

Einfache Mathematik der Kettenreaktion

Um die grundlegenden Eigenschaften der Kettenreaktion zu untersuchen und so einen Eindruck zu gewinnen von ihren ungeheuren Möglichkeiten, wollen wir uns in die Lage der

Wissenschaftler versetzen, als sie unmittelbar nach der Entdeckung der Kernspaltung über deren Rolle für die Kettenreaktion nachdachten. So wollen wir uns im Moment nicht mit in das einzelne gehenden Schwierigkeiten plagen — glücklicherweise, denn es gibt wirklich viele —, sondern untersuchen, wie die ideelle Kettenreaktion „im Prinzip" vor sich geht.

Wegen der rein gedanklichen Natur unseres Experimentes können wir einfach annehmen, daß wir eine ausreichende Menge des reinen U^{235}-Isotops haben, dabei wollen wir im Moment nicht feststellen, wie groß „ausreichend groß" ist. Wir gehen so vor, wie es Wissenschaftler in ähnlichen Situationen immer tun, wir machen einige „vereinfachende Annahmen", so daß unsere Mathematik in einfacher Form dargestellt werden kann. Wir wissen z. B., daß ein Urankern bei der Spaltung 1, 2, 3, 4 oder sogar mehr Neutronen emittiert — im *Mittel* sind es 2,5. Wir nehmen jedoch gegenwärtig aus Gründen der Einfachheit an, daß der U^{235}-Kern bei der Spaltung genau 3 Neutronen emittiert, das *Prinzip* der Kettenreaktion wird dadurch nicht geändert, und wir brauchen uns nicht mit Brüchen zu plagen. Wir nehmen ferner aus Gründen der Bequemlichkeit an, daß jedes erzeugte Neutron sich durch die ganze Uranmasse bewegt, bis es schließlich von einem Urankern absorbiert wird; die Wahrscheinlichkeit, daß ein Neutron ein anderes Schicksal erleidet, wird vernachlässigt, und die Uranmenge sei so groß, daß durch die Spaltung erzeugte Neutronen nicht entkommen können, ohne einen Urankern zu treffen.

Unsere vereinfachenden Annahmen machen es leicht, den schnellen Verlauf einer Kettenreaktion in Uran zu verfolgen, von dem Zeitpunkt an, zu dem erst einige Kerne zerbrechen, bis zur Freisetzung von Energie in großem Maßstab. Um die Kettenreaktion in der von uns angenommenen großen Menge von reinem U^{235} einzuleiten, ist es notwendig, in dieser Menge irgendwie ein Neutron zu erzeugen. Diese Neutronen könnte man mit einer äußeren Neutronenquelle herstellen, z. B. einem Zyklotron, aber praktisch wäre das eine unnötige Erschwerung. Freie Neutronen sind in jedem Material vorhanden, z. B. infolge *kosmischer Strahlen*, die aus dem Weltraum in

die Erdatmosphäre eintreten und über der ganzen Erdoberfläche Neutronen erzeugen. Außerdem erzeugt die beim spontanen Zerfall schwerer Atome emittierte Alpha-Strahlung beim Auftreffen auf bestimmte Stoffe dauernd Neutronen, oder es entstehen Neutronen bei der *spontanen* Spaltung, die auch ohne Neutronenabsorption in U^{235} in geringem Maße stattfindet.

So würden also in der von uns betrachteten großen U^{235}-Menge auch ohne unser Dazutun Neutronen vorhanden sein, und eines von diesen würde in einen U^{235}-Kern eindringen, Kernspaltung verursachen und so die Kettenreaktion auslösen. Gemäß unseren vereinfachenden Annahmen würden dann bei der Spaltung des Kerns drei Neutronen emittiert, die sich weiterbewegen, bis jedes in den Kern eines anderen U^{235}-Atoms eingedrungen ist und dort Kernspaltung verursacht. Als Ergebnis der drei so erfolgten Spaltungen würden 9 Neutronen entstehen; die Situation zu diesem Zeitpunkt zeigt Fig. 11. Unmittelbar nachher würden die Neutronen wieder in Kerne eindringen, und die dabei erzeugten 9 Spaltungen liefern 27 Neutronen.

Die von uns im Augenblick betrachteten Zahlen im Anfangsstadium der Kettenreaktion sind noch äußerst klein, verglichen mit der wirklich ungeheuren Zahl der U^{235}-Atome, die in unserer Versuchsmenge enthalten sind. Die Kettenreaktion

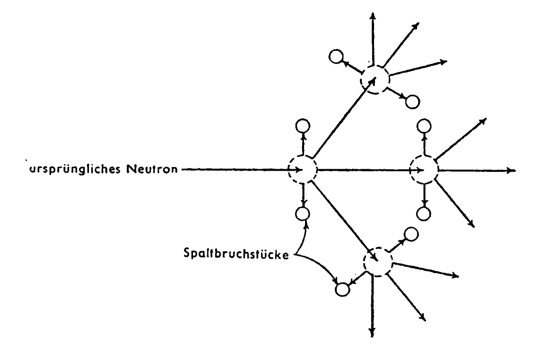


Fig. 11. Der Beginn einer idealisierten Kettenreaktion, in der bei jeder Kernspaltung drei Neutronen emittiert werden.

ist also vorerst nur eine winzige Störung, die so lange unbedeutend ist, bis sie Zahlen erreicht, die mit der Zahl der vorhandenen U^{235}-Atome vergleichbar sind. Aber bevor wir die Zahlen so groß werden lassen, wollen wir uns mit einigen mathematischen Prinzipien beschäftigen, die schon bei dieser fortgesetzten Multiplikation mit 3 auftreten. Wir benützen dabei eine neue charakteristische Form der wissenschaftlichen „Erklärung", nämlich die Verwendung von Analogien. Als Analogon zur Kettenreaktion gebraucht man eine menschliche Bevölkerung, und die tatsächlichen, auch bei der strengsten wissenschaftlichen Diskussion der Kettenreaktion benützten Fachausdrücke sind die gleichen, wie sie für das Wachstum einer Bevölkerung üblich sind.

Unter Verwendung der gebräuchlichen Fachsprache sagen wir im gegenwärtigen Fall, daß in der ersten *Generation* ein, in der zweiten Generation drei, in der dritten neun usw. Neutronen vorhanden sind. Von großer Bedeutung ist offensichtlich die Länge der Zeit, die zwischen den Spaltungen liegt, also die Zeit für jede Generation, die man erwartungsgemäß als *Neutronenlebensdauer* oder *Generationsdauer* bezeichnet. Wäre die Generationsdauer sehr lang, z. B. eine Minute, so müßten wir äußerst lange Zeit warten, um große Zahlen zu erreichen, und eine schnelle Kettenreaktion wäre unmöglich. Die tatsächliche Generationsdauer ist sehr kurz, nämlich gerade die Zeit, die ein Neutron im Mittel braucht, um sich von seinem Entstehungsort zu dem Atom zu bewegen, das es absorbiert.

Wie wir wissen, muß sich das Neutron durch Milliarden von Uranatomen bewegen, bevor es eine Spaltung auslöst. Dieser Prozeß erfordert ja einen Zusammenstoß mit einem Kern, während das Neutron gewöhnlich nur den äußeren Bereich jedes auf dem Weg liegenden Atoms berührt. Obgleich Milliarden von Atomen passiert werden müssen, bevor eine Spaltung erzeugt wird, ist die benötigte Zeit doch sehr kurz. Ein bei einer Spaltung entstehendes Neutron hat eine Energie von etwa 1 Million Elektronenvolt, also nur einen kleinen Bruchteil der insgesamt bei einer Spaltung frei werdenden Energie, die hauptsächlich als kinetische Energie der Spaltbruchstücke erscheint. Die Neutronengeschwindigkeit ist aber

sehr groß, etwa 5 Prozent der Lichtgeschwindigkeit, also etwa 15 000 km pro Sekunde. Bei einer so hohen Geschwindigkeit ist es nicht überraschend, daß das Neutron zum Zurücklegen der paar Zentimeter, bis es absorbiert wird, nur eine Zeit von der Größe einiger milliardstel Sekunden braucht.

Wegen dieser ungeheuer kleinen Generationsdauer von etwa einer milliardstel Sekunde gelangen wir in einer unglaublich kurzen Zeit von dem durch das Aufspalten einiger Atome gekennzeichneten mikroskopischen Zustand zu dem makroskopischen Zustand, in dem wir die Freisetzung von Energie mit Einheiten wie Tonnen Trinitrotoluol (TNT) oder Kilowattstunden und nicht mehr mit Größen, die einzelnen Atomen entsprechen, messen. Im Endzustand ist die Zahl der in einer gegebenen Zeit stattfindenden Spaltungen, verglichen mit den wenigen anfänglichen, ungeheuer: Milliarden über Milliarden von Spaltungen anstatt einigen. Wir können aber einfach zeigen, daß die Zeit zum Erreichen dieses makroskopischen, vielleicht explosionsartigen Zustandes immer noch kurz ist. Würden wir fortfahren, mit 3 zu multiplizieren, so würden wir müde werden, längst bevor wir die für die Freisetzung großer Energiemengen notwendigen Zahlen erreichen. Glücklicherweise können wir diesen mühsamen Vorgang vermeiden, denn es ist ein sehr leichtes mathematisches Problem, das Ergebnis vorauszusagen, das sich beim fortgesetzten Multiplizieren mit der gleichen Zahl ergibt, und wir können ohne Schwierigkeit das zu einer bestimmten Zeit gehörige Resultat angeben. Wenn eine Größe regelmäßig mit einer vorgegebenen Zahl multipliziert wird, so werden die Ergebnisse durch eine *Exponentialfunktion* wiedergegeben, die zugehörigen Zahlenwerte kann man leicht in den üblichen mathematischen Tabellen, oder noch leichter, wie wir zeigen werden, aus einer graphischen Darstellung finden. Das einfachste und vertrauteste Beispiel einer Exponentialfunktion ist die regelmäßige Multiplikation eines auf Zinseszinsen angelegten Kapitals. Der Vorgang ist genau der gleiche wie bei der Kettenreaktion, nur ist die Zunahme innerhalb einer bestimmten Zeit unglücklicherweise viel, viel geringer. So erfährt ein auf 3 Prozent Zinseszinsen pro Jahr angelegtes Geld jedes Jahr eine Multiplikation mit 1,03. Eine Deutsche Mark wächst also in jähr-

lichen Intervallen auf 1,03; 1,061; 1,093 usw. an. 500 Jahre später allerdings beträgt der Zuwachs im nächsten Jahr schon etwa 80 000,– DM, an Stelle der anfänglichen 3 Pfennige.

In unserem Fall, also bei der Kettenreaktion, multiplizieren wir nicht mit 1,03, sondern mit 3 und, anstatt jährlich, jede milliardstel Sekunde. Mit anderen Worten, der Verzinsungsfaktor beträgt 300 Prozent je milliardstel Sekunde! Das resultierende Wachstum des Vermögens (der Neutronen) wird am besten zeichnerisch dargestellt, wie in Fig. 12. Man bemerkt in dieser Figur, daß die Zahlen auf der senkrechten Linie, entsprechend dem Vermögen, im *logarithmischen Maßstab*, der sich vom gewöhnlichen linearen stark unterscheidet, aufgetragen sind. Die Wirkung dieses Maßstabes ist sehr nützlich, der exponentielle Verlauf, also die Art der Zunahme, die sich bei

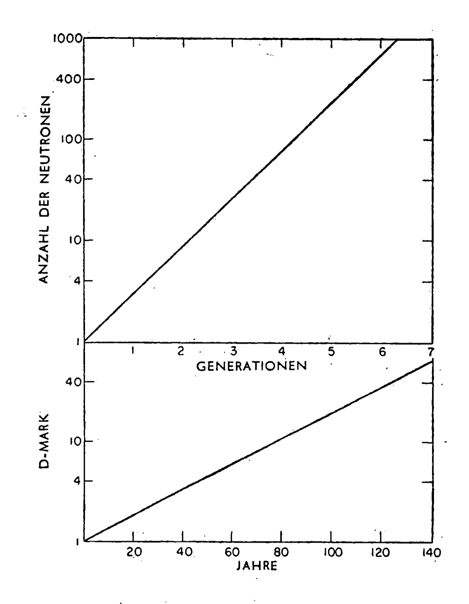


Fig. 12. Zwei Beispiele für Exponentialkurven: die obere für die Kettenreaktion, die untere für 3⁰/₀ Zinseszinsen. Exponentialkurven erscheinen als Gerade, wenn der vertikale Maßstab, wie in dieser Figur, logarithmisch ist.

regelmäßig wiederholter Multiplikation ergibt, läßt sich so durch eine gerade Linie darstellen.

Das langsame Wachstum, entsprechend dem Zinsfuß von 3 Prozent je Jahr, wird im unteren Teil der Fig. 12 dargestellt; man sieht, daß während vieler Jahre nur ein geringer jährlicher Zuwachs stattfindet. Der obere, der Kettenreaktion entsprechende Teil der Fig. 12 zeigt, daß innerhalb sehr kurzer Zeit die Zahl der Neutronen ungeheuer zunimmt. So vermehrt sich die Neutronenbevölkerung in etwa 7 milliardstel Sekunden um das Tausendfache. Man kann also leicht einsehen, daß innerhalb sehr kurzer Zeit makroskopische Energiebeträge freigesetzt werden; an Stelle der Energie, die der Spaltung von einigen Kernen entspricht, handelt es sich jetzt um Tausende von Kilowattstunden. Das Problem besteht also nicht im Warten auf die Ausbreitung der Kettenreaktion, sondern darin, sie nach Herstellung der Voraussetzungen für ihre Ausbreitung an einer zu heftigen, zu einer Explosion führenden Weiterentwicklung zu hindern.

Die praktischen Schwierigkeiten

Die außerordentlichen Möglichkeiten der Freisetzung von Kernenergie in der eben skizzierten Weise riefen bei einigen Wissenschaftlern große Begeisterung hervor, obwohl die von uns so weitgehend vernachlässigten praktischen Schwierigkeiten ebenfalls außerordentlich waren. Den vorsichtigeren Wissenschaftlern dagegen schienen die praktischen Schwierigkeiten unüberwindbar, und einige glaubten sogar, daß man weder die explosionsartige noch die kontrollierte, für friedliche Zwecke geeignete Kettenreaktion jemals erreichen könnte. Hätte es nicht der verschwenderischen technischen Unterstützung einer Kriegswirtschaft gedient, wäre es tatsächlich gut möglich gewesen, daß das für die praktische Herstellung einer Kettenreaktion notwendige ungeheure Programm jahrzehntelang von einer ernsten Anstrengung abgeschreckt hätte. Ein einfaches, von den Pessimisten damals vorgebrachtes Argument war, wie schon erwähnt, daß, wenn eine Kettenreaktion möglich wäre, diese in der Natur schon stattgefunden hätte,

und zwar zu einer Zeit, als zufällig die richtige Zusammensetzung von Uran und Neutronen vorhanden war.

Ein wichtiger Punkt dieser pessimistischen Feststellung ist, daß sie nur für die Art der Kettenreaktion Anwendung finden kann, die in *natürlichem Uran,* das überwiegend aus U^{238} besteht, stattfinden könnte. Man erkannte, daß eine Kettenreaktion viel eher möglich sein würde, wenn man die Uranisotope trennte und nur reines U^{235}, das leichter spaltbare Isotop, benützte. Die Isotopentrennung in großem Maßstab, z. B. die Erzeugung von mehreren Kilogramm, war bis zu dieser Zeit noch nicht ausgeführt worden und würde allein schon eine riesige industrielle Anlage erfordern. In U^{235} können Neutronen aller Geschwindigkeiten Spaltung erzeugen, in U^{238} dagegen nur die energiereichsten Neutronen. Aber sogar unter Verwendung des reinen U^{235}-Isotops war es keineswegs offensichtlich, daß eine Kettenreaktion in praktisch brauchbarer Weise erreicht werden könnte. Um die mit der Herstellung einer Kettenreaktion verbundenen Schwierigkeiten zu untersuchen, wollen wir zuerst betrachten, wie sie in reinem U^{235} verläuft, und im Moment das schwierigere Problem einer Kettenreaktion in natürlichem Uran beiseite lassen.

Alles, was wir über die Kettenreaktion in U^{235} aussagen, trifft in gleicher Weise für Pu^{239}, ein Isotop des Elementes *Plutonium,* zu, das einen anderen wichtigen spaltbaren Kern darstellt. Dieses Isotop konnte aber für die ersten Untersuchungen der Kettenreaktion nicht verwendet werden, da seine Herstellung in genügend großen Mengen erst mit Hilfe der schon erreichten Kettenreaktion möglich war.

Bei der Betrachtung der Kettenreaktion in reinem U^{235} wollen wir uns zuerst ein Experiment vorstellen, mit dem wir die Kernspaltung untersuchen, die Neutronen in einer kleinen Menge des Isotops U^{235} hervorrufen. Es würde sicher ein kleines Stück U^{235} sein, besonders wenn das Experiment am Anfang der Entwicklung der Atomenergie durchgeführt wurde, als wegen der großen Schwierigkeiten der Isotopentrennung nur kleine Mengen U^{235} verfügbar waren. So wollen wir uns vorstellen, daß wir ein Stück U^{235} von der ungefähren Größe einer Murmel, das entspricht der gesamten Menge, die um 1944 vorhanden war, mit Neutronen beschießen. Unsere be-

reits erworbenen Kenntnisse über Isotope erlauben uns vorauszusagen, daß dieses Stück U^{235} normalem Uranmetall, das überwiegend aus U^{238} besteht, genau gleicht. Bezüglich der atomaren Eigenschaften, wie Härte, Aussehen, chemische Reaktionen usw., kann es von normalem Uranmetall nicht unterschieden werden. Bezüglich der den *Kern* betreffenden Eigenschaften bestehen wesentliche Unterschiede, aber alle atomaren Eigenschaften beruhen auf der äußeren Anordnung der Elektronen, die für U^{235} und U^{238} mit jeweils 92 Elektronen gleich ist.

Würde das Experiment in einem gut eingerichteten Laboratorium durchgeführt, so wäre ohne Zweifel eine Neutronenquelle vorhanden, die uns die zum Beschuß unseres Uranstückes erforderlichen Neutronen liefern würde. In unserem gedachten Experiment können wir auf eine gedachte Neutronenquelle verzichten, denn es würden genügend Neutronen durch den Raum fliegen, um in dem Uranstück je Sekunde eine beträchtliche Anzahl von Spaltungen hervorzurufen.

So wollen wir nun ein Uranatom näher betrachten, dessen Kern sich gerade aufgespalten hat. Die sich schnell auseinanderbewegenden Spaltbruchstücke emittieren mehrere schnelle Neutronen; wir wollen annehmen, daß es drei sind. Die Neutronen werden bei ihrer Bewegung in dem kleinen festen Uranstück wenig behindert, weil sie elektrisch neutral sind und sich daher, von den Elektronen nicht beeinflußt, frei durch den äußeren Bereich der Uranatome bewegen. Der Kern ist so klein, daß die Wahrscheinlichkeit, daß ein Neutron während der Bewegung durch ein Atom mit ihm zusammenstößt, äußerst gering ist. Infolgedessen legen die Neutronen mehrere Zentimeter zurück und passieren dabei Milliarden von Atomen, bis die Wahrscheinlichkeit, daß sie von einem Kern absorbiert werden, groß wird. Da unser Uranstück so klein ist, ist der wahrscheinlichste Vorgang der, daß die drei Neutronen nicht absorbiert werden, sondern, ohne eine weitere Spaltung zu verursachen, entweichen. In der Fachsprache würde man sagen, daß der *Neutronenverlust* durch Entweichen so groß ist, daß keine Kettenreaktion eintritt.

Weitere Spaltungen würden erfolgen, wenn von außen andere Neutronen in das Uranstück eintreten, natürlich würde

jedes einfallende Neutron nur mit geringer Wahrscheinlichkeit eine Spaltung auslösen. Der wichtigste Punkt aber ist, daß dabei keine *Multiplikation* entsprechend dem „im Prinzip" diskutierten $3 \times 3 \times 3$-Vorgang eintritt. Wegen des großen Neutronenverlustes durch Entweichen besteht für ein Neutron einer Generation nur eine geringe Wahrscheinlichkeit, daß es überhaupt eine andere Generation erzeugt. Mathematisch wird der gegenwärtige Fall durch die Multiplikation mit einer kleineren Zahl als 3 dargestellt, tatsächlich ist für unser Uranstück die Zahl, welche die Wahrscheinlichkeit dafür angibt, daß ein Neutron einer Generation in der nächsten Generation ein anderes erzeugt, ungefähr 0,1. Fortgesetzte Multiplikation mit 0,1 ergibt aber bald ein bedeutungslos kleines Ergebnis.

Die kritische Größe

Es ist ziemlich klar, was man unternehmen muß, um den Neutronenverlust durch Entweichen zu vermindern und so die Aussicht auf die Herstellung einer Kettenreaktion zu vergrößern; wir müssen um unser ursprüngliches Stück mehr U^{235} anhäufen, um das Entweichen von Neutronen zu verhindern. Wir haben erwähnt, daß sich schnelle Neutronen mehrere Zentimeter durch festes Uran bewegen müssen, bis die Wahrscheinlichkeit, daß sie einen Kern treffen, groß wird. Es ist klar, daß die Wahrscheinlichkeit für den Neutronenverlust durch Entweichen sehr klein wird, wenn unser Uranstück an Stelle der Größe einer Murmel die Größe eines Basketballes hat. Im Falle unseres großen Uranklumpens wird ein Neutron unter der Voraussetzung, daß es an keinem anderen Prozeß teilnimmt, höchstwahrscheinlich nicht entweichen, sondern von einem anderen Urankern absorbiert werden und so die Emission von drei Neutronen bewirken.

Also würde für diese große Menge U^{235} bei vollständiger Außerachtlassung des Verlustes durch Entweichen die oben diskutierte und in Fig. 12 dargestellte Abhängigkeit gelten. Unser gedachtes Experiment würde fast augenblicklich ungeheuer explosiv werden, denn jedes in den Uranklumpen eintretende Neutron würde die sehr schnelle Neutronenvermehrung aus-

lösen — die 3×3×3 von Fig. 12. Die durch die ungeheuere Zahl von schnell erfolgten Spaltungen frei gewordene Energie würde die Heftigkeit einer Explosion haben, kurz gesagt, das Ergebnis wäre die Explosion einer gigantischen Bombe.

Tatsächlich muß zwischen den extremen Größen der Murmel und des Basketballes, also zwischen den Extremen, daß im wesentlichen nichts passiert und eine ungeheuere Explosion stattfindet, eine Größe existieren, bei der zwar etwas passiert, aber in relativ regelbarer Weise. Es ist fast unmittelbar ersichtlich, daß unser eben beschriebenes Experiment mit dem großen U^{235}-Klumpen nicht durchführbar ist, denn man könnte es nicht aufbauen — es würde dabei explodieren. Diese Folgerungen sind der Schlüssel für die ganze Situation, denn es gibt in der Tat eine *kritische Größe* oder eine *kritische Masse* U^{235}, bei der eine Kettenreaktion gerade möglich ist.

Eine U^{235}-Menge, die unter der kritischen Größe liegt, ist völlig stabil und völlig harmlos. In dieser *unterkritischen Masse* finden Spaltungen statt, und die dadurch erzeugten Neutronen verursachen manchmal weitere Spaltungen. Bei einer solchen Masse ist aber die Zahl der Neutronen in einer Generation immer geringer als die Zahl der Vorfahren in der vorhergehenden Generation. Mit anderen Worten, anstatt mit etwa 3×3×3 hätten wir mit einer Zahl, die kleiner ist als 1, z. B. 0,9, zu multiplizieren; die Neutronenbevölkerung würde also von Generation zu Generation abnehmen, abgesehen davon, daß natürlich die Möglichkeit einer Auffüllung mit frischen Neutronen aus äußeren Quellen besteht.

Eine Uranmasse, die über der kritischen Masse liegt, hat eine Neutronenbevölkerung, die mit jeder Generation zunimmt. Ist die Uranmasse kaum größer als die kritische Masse, so kann die Zahl, mit der wir multiplizieren, nur wenig größer als 1 sein — vielleicht gerade 1,03, um auf die Analogie mit dem Zinseszins zurückzukommen. In diesem Fall würde die Zahl der Neutronen sicher zunehmen, aber langsam, so langsam, daß keine Explosion entstehen würde. Wir müssen sorgfältig beachten, daß die Vermehrung langsam vor sich geht, weil die Zahl, mit der multipliziert wird, wenig größer als 1 ist, und nicht, weil sich die *Generationsdauer* irgendwie ändert. Diese bleibt gleich, unabhängig davon, wieviel Uran

benützt wird. Das Verhalten über- und unterkritischer Massen U^{235} ist in Fig. 13 dargestellt.

Der genaue Wert für die kritische Masse Uran wird noch geheimgehalten, aber in offiziell veröffentlichten Informationen der Atomenergiekommission wird festgestellt, daß die kritische Masse größer als ein Golfball, aber kleiner als ein Basketball ist. Die Größe kann ohne bedeutende Schwierigkeit geschätzt werden, und zwar auf Grund der von uns bereits behandelten Tatsache, daß sich ein schnelles Neutron mehrere Zentimeter bewegt, bis es absorbiert wird. Durch dieses Maß ist die Größe der Materialmenge, die notwendig ist, um ein zu starkes Entweichen von Neutronen zu verhindern, und damit die kritische Masse bestimmt.

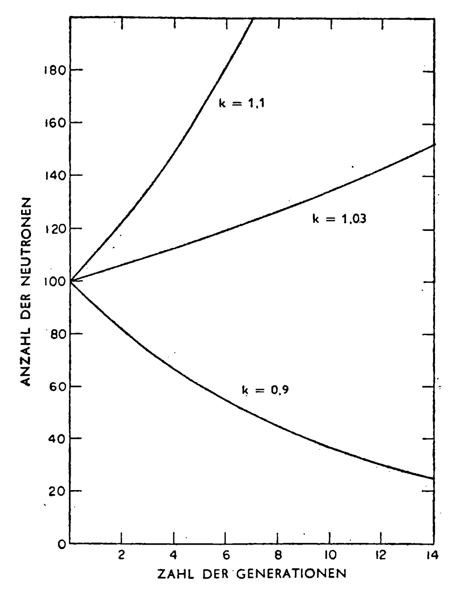


Fig. 13. Die Zahl der nach dem Einfall von 100 Neutronen entstehenden Neutronen in Abhängigkeit von der Zeit und dem Vermehrungsfaktor k, der knapp über 1 und knapp unter 1 liegt.

Weil man die Vermehrung der Neutronen je nach Größe des verwendeten Uranstücks mehr oder weniger schnell verlaufen lassen kann, ist es möglich, eine Kettenreaktion herzustellen, die ruhig oder mit explosionsartiger Heftigkeit verläuft. Es hängt einfach davon ab, wie wir die Zahl, mit der die Neutronenbevölkerung in jeder Generation multipliziert wird, wählen; der in Betracht kommende Bereich erstreckt sich von 1 bis 3. Jetzt können wir ebensogut den richtigen Fachausdruck für diese zum Multiplizieren verwendete Zahl einführen und uns so viele Worte sparen. In Analogie zu einer menschlichen Bevölkerung nennt man sie den *Vermehrungsfaktor*. Ist der Vermehrungsfaktor etwas kleiner als 1, weil das Uranstück gerade unterkritisch ist, so tritt keine Kettenreaktion ein. Die Zahl der Neutronen, die in dem Uranstück sind und aus ihm entweichen, ist trotzdem ziemlich groß, weil viele der bei der Spaltung emittierten Neutronen weitere Spaltungen und damit Neutronen erzeugen. Aber im Durchschnitt ist die Zahl der in jeder Generation erzeugten Neutronen etwas kleiner als in der vorhergehenden, wie es Fig. 13 zeigt.

Fügen wir dem Uranstück noch etwas Uran hinzu, gerade genügend, um den Vermehrungsfaktor etwas größer als 1 zu machen, so bemerken wir, daß die Zahl der aus dem Uranstück kommenden Neutronen mit der Zeit sehr langsam zunimmt, wie in Fig. 13 dargestellt. Ein noch langsameres Ansteigen der Exponentialfunktion entsprechend einer Zunahme von viel weniger als 1 Prozent in jeder Generation könnte man erreichen, wenn man die U^{235}-Menge sorgfältig etwas über die kritische Masse hinaus vergrößern würde. Unter diesen Umständen könnten hinzugefügte Stücke leicht wieder entfernt werden, bevor die Neutronenintensität gefährlich groß würde.

Machen wir als anderes Extrem unseren Uranklumpen so groß, daß der Vermehrungsfaktor ungefähr 2 ist, dann erfolgt die Vermehrung so schnell, daß eine Explosion eintritt. Natürlich erhebt sich sofort die Frage, wie können wir den Klumpen überhaupt so groß machen, ohne daß er dabei schon explodiert? Wir können nicht sagen, „man verhindere einfach,

daß während des Vorganges in den Klumpen Neutronen eintreten", weil ja einige der Uranatome *spontan aufspalten*, also eine Kernspaltung ohne Absorption von Neutronen vor sich geht. Bei diesen spontanen Spaltungen werden dauernd Neutronen erzeugt, wir können also den Uranklumpen bei seiner Herstellung nicht frei von Neutronen halten.

Die einzige Antwort ist die, daß das Zusammenbringen der Stücke so rasch erfolgen muß, daß sie zusammenkommen, bevor sie durch die Gewalt der Explosion auseinanderfliegen. In diesem Fall stellt unser Experiment wirklich die Explosion einer *Atombombe* dar; tatsächlich ist dieses rasche Zusammenfügen genau der Prozeß, durch den eine Atombombe zur Explosion gebracht wird. Die Atombombe besteht aus voneinander getrennten U^{235}- (oder Pu^{239}-) Stücken, die zum Auslösen der Explosion so schnell wie möglich zu einer überkritischen Masse zusammengefügt werden. Die Methode des Zusammenfügens ist im einzelnen noch militärisches Geheimnis, aber das Prinzip des Vorganges ist, daß Uranstücke plötzlich zusammengeschleudert werden und dabei eine kompakte Masse größter Dichte erreicht wird; das Zusammenschleudern erfolgt unter Anwendung von Sprengstoffen. Der *Wirkungsgrad* der Explosion, gekennzeichnet durch den Bruchteil der Uranatome, die aufspalten, bevor die ganze Masse auseinandergesprengt wird, hängt in großem Maße von der Art ab, wie die Teile zusammengeschleudert werden und welche Dichte dabei erreicht wird. Natürlich werden in einer Atombombe auch unter den günstigsten Bedingungen nicht alle Uranatome gespalten. Die Verbesserung der Methoden zur Auslösung der Explosion und damit des Wirkungsgrades ist Gegenstand intensiver Forschung.

Die geregelte Kettenreaktion

Wir haben nicht die Absicht, in diesem Buch Atombomben, Methoden für ihre Explosion, ihre Anwendung oder Wirkung zu behandeln, auch wenn wir in Kapitel 8 die sehr wichtige Frage des sich durch die Explosion einer Atombombe ergebenden *radioaktiven Niederschlages* behandeln. Wir gebrauchten

die Atombombe lediglich zur Verdeutlichung einer extremen Form der Kettenreaktion — der Form, welche die Kernkräfte mit ungeregelter Heftigkeit freisetzt. Mit etwas weniger Uran, in dem sich die Kettenreaktion durch Hinzufügen und Wegnehmen von Uranstücken leicht regeln läßt, würden wir eine *geregelte Kettenreaktion* erhalten. Allerdings wäre sie in dieser Weise kaum für praktische Zwecke wie die Energiegewinnung geeignet. Aber an unserem Uranklumpen konnten wir das Prinzip des *Vermehrungsfaktors* erläutern und zeigen, warum in einer bestimmten kritischen Masse Uran eine Kettenreaktion eintritt, dagegen eine etwas kleinere Masse völlig stabil ist.

Ein wichtiger Punkt, den wir nicht besonders erwähnten, der aber direkt aus unserer Diskussion folgt, ist, daß die beim Ablaufen einer Kettenreaktion erzeugte *Leistungsgröße* nicht von der Masse des Urans, sondern nur davon abhängt, wie lange eine Vermehrung stattfand. Selbst wenn die Uranmasse noch so wenig über der kritischen liegt, kann die Größe der erzeugten Leistung, das ist im wesentlichen die innerhalb einer bestimmten Zeit erzeugte Wärmeenergie, die von der Zahl der in dieser Zeit stattfindenden Spaltungen abhängt, jeden beliebigen Wert erreichen. Man muß lediglich die Vermehrung genügend lange Zeit stattfinden lassen. Die zeitliche Zunahme der Leistungsgröße, bestimmt durch die Exponentialkurven in Fig. 13, ist natürlich von der Uranmasse abhängig, dagegen nicht die am Ende erreichte Größe der Leistung. Tatsächlich kann im Prinzip jede Leistungsgröße erreicht werden, wenn wir nur lange genug warten.

Natürlich genügt es nicht nur, lange genug zu warten (aus diesem Grund verwandten wir das „im Prinzip"), sondern man muß die erzeugte Wärmeenergie aus dem Uranklumpen abführen, um zu vermeiden, daß er schmilzt. Außerdem müssen wir uns selbst auf irgendeine Weise vor den vielen bei einer Kettenreaktion frei werdenden Neutronen und der Strahlung der entstehenden radioaktiven Atome schützen. Mit anderen Worten: bei einer Kettenreaktion großen Maßstabes bereitet die Handhabung der dabei entstehenden drei Produkte — Wärmeenergie, radioaktive Spaltbruchstücke und Neutronen — ernste praktische Schwierigkeiten.

Die Brauchbarkeit unseres einfachen, mit Handarbeit aus U^{235}-Stücken aufgebauten Kernreaktors erfordert also die Lösung vieler praktischer Aufgaben. Das von uns als reine Gedankenkonstruktion dargestellte Experiment ist in Wirklichkeit eine genaue Beschreibung der Experimente, wie man sie während der Kriegsjahre oft durchführte. Man häufte langsam kleine Stücke U^{235} oder Plutonium (Pu^{239}) auf, bis, wie von uns beschrieben, gerade der kritische Punkt erreicht wurde; die Stärke der Kettenreaktion hielt man so niedrig, daß keine schädlichen Folgen auftraten. Die Regelung der Reaktionsgeschwindigkeit wurde einfach so vorgenommen, daß man das letzte Stück U^{235} oder Pu^{239} langsam dem großen Haufen Spaltmaterial näherte. Das sich aus der Erzeugung und dem Verlust von Neutronen ergebende Gleichgewicht ist so empfindlich, daß man für eine Anordnung nahe der kritischen Größe die letzte Regelung des Vermehrungsfaktors einfach dadurch erreichen konnte, daß man seine Hand in die Nähe der Uran- oder Plutoniumanordnung hielt. Dies erklärt sich daraus, daß durch die Hand ein Teil der aus der Anordnung *entweichenden* Neutronen in diese *zurückreflektiert* oder zurückgestreut wird, und das reicht bei der sehr wenig unter der kritischen Größe liegenden Anordnung aus, den Vermehrungsfaktor größer als 1 zu machen. So konnte also der Verlauf der Kettenreaktion, gemessen durch die von einem Geigerzähler registrierte Strahlung, buchstäblich mit einer Handbewegung geregelt werden.

Eine tragische Begebenheit in diesem Zusammenhang, welche die sehr starke Abhängigkeit der Kettenreaktion vom Vermehrungsfaktor deutlich macht, ist das zweimalige Vorkommen von verhängnisvollen Fehlern während solcher Experimente in Los Alamos. Die Fehler waren einfach — das letzte Stück wurde der Anordnung zu schnell genähert —, aber die Folgen waren sehr schwerwiegend. Die Reaktion nahm mit großer Geschwindigkeit zu, und obgleich keine Explosion eintrat, war die auftretende Neutronen-, Beta- und Gammastrahlung so stark, daß nach jedem der beiden Unfälle ein Wissenschaftler infolge der empfangenen Überdosis an Strahlung starb.

Der Zweck dieser Experimente mit handgebauten Kernreak-

toren war, durch die dabei erfolgende Bestimmung der kritischen Bedingungen die Reinheit der spaltbaren Materialien U^{235} und Pu^{239} festzustellen. Bestimmte chemische Elemente absorbieren nämlich sehr stark Neutronen, die dann für die Kettenreaktion verlorengehen. Es ist deshalb wichtig, daß das spaltbare Material sehr rein ist, damit die Kettenreaktion mit einem Minimum an Material erreicht werden kann. Die in Los Alamos durchgeführten sogenannten *kritischen Experimente* dienten lediglich diesem Zweck, also der Bestimmung der Reinheit von U^{235} und Pu^{239}. Man erhielt dabei die genaue Masse, die für das Eintreten einer Kettenreaktion oder, wie es in der Fachsprache heißt, für das Erreichen des *kritischen Zustandes* notwendig ist.

Der erste Kernreaktor — der „Pile"

Die handgebauten, eben beschriebenen Reaktoren sind praktisch kaum brauchbar, weil die Wärmeenergie nicht abgeführt werden kann und kein Strahlungsschutz vorhanden ist. Außerdem gibt es noch andere zwingende Gründe, warum diese Art des Aufbaues für eine praktisch verwertbare, regelbare Kettenreaktion nicht geeignet ist. So wichtig der Strahlenschutz und die Abführung der Wärmeenergie sind, ein noch wichtigerer Einwand ist, daß diese Art von Reaktor reines U^{235} erfordert, ein Isotop, dessen Gewinnung sehr schwierig ist. Aus diesem Grund war die Hauptaufgabe während des Krieges, eine andere Art der Kettenreaktion zu finden — eine, die in normalem Uran stattfindet und damit die äußerst schwierige Trennung der Isotope U^{235} und U^{238} vermeidet. Es ist eine dramatische Geschichte, auf die wir aber im einzelnen nicht eingehen können, wie sich die Wissenschaftler in den Jahren 1940, 1941 und 1942 unermüdlich bemühten, einen Weg zu finden, wie der Vermehrungsfaktor in *natürlichem Uran* größer als 1 gemacht werden könnte.

Man erkannte bald, daß der Vermehrungsfaktor in natürlichem, als Metall vorliegendem Uran eindeutig kleiner als 1 ist, auch wenn es keinerlei Verunreinigungen enthält. Die ersten Versuche und Berechnungen zeigten jedoch, daß durch

geeignete Kombination anderer Materialien mit Uran eine Vergrößerung des Vermehrungsfaktors erreicht werden kann. Die große Frage war also, welche Kombination von Materialien geeignet ist, um in natürlichem Uran, das weniger als 1 Prozent U^{235} enthält, eine geregelte Kettenreaktion herzustellen.

Wir haben zwar der Einfachheit halber die Kettenreaktion in reinem U^{235} *dargestellt*, für die erste *erzeugte* geregelte Kettenreaktion im Dezember 1942 wurde aber natürliches Uran verwendet. Es wäre viel einfacher gewesen, die erste Kettenreaktion mit den reinen Isotopen U^{235} oder Pu^{239} zu erreichen, aber diese waren 1942 noch nicht verfügbar. Die erste explosive Kettenreaktion, die Atombombe, für die man reines U^{235} verwendete, wurde erst 1945 erreicht; die dazwischenliegenden drei Jahre entsprechen der Zeit, die man brauchte, um so viel U^{235} von U^{238} abzutrennen, daß es für die Atombombe ausreichte. Die Kettenreaktion in natürlichem Uran fand in dem ersten *Pile* der Welt oder, wie man heute sagt, in dem ersten *Kernreaktor* statt.

Die Bezeichnung *Pile* (Anm. d. Übers.: auf deutsch *Haufen*) kommt daher, daß man die Anordnung, in der die erste Kettenreaktion stattfand, so herstellte, daß man das verwendete Material in einem ebenerdig liegenden Raum *anhäufte*. Der größte ebenerdig liegende Raum, der in der Universität von Chikago 1942 zur Verfügung stand, war ein für Spiele verwendeter Hofraum, und in diesem entstand unter der Leitung von Enrico Fermi die erste Kernkettenreaktion. Zum Bau der Anordnung häufte man Ziegel aus Graphit, das ist die eine der beiden Kristallformen des Elementes Kohlenstoff, in regelmäßigen Lagen auf und ordnete in diesem Haufen von Graphitziegeln Blöcke aus reinem Uranmetall von mehreren Zentimetern Größe an. Fig. 14 (Tafel) zeigt diese Anordnung mit mehreren aufgehäuften Lagen.

Die Idee, die dieser recht ungewöhnlichen Kombination aus Graphit- und Uranziegeln zugrunde liegt, ist ungemein wichtig und ein Grundstein für die erfolgreiche Freisetzung der Kernenergie. Die Kerne der Kohlenstoffatome haben die Eigenschaft, die Geschwindigkeit der Neutronen, von denen sie getroffen werden, stark herabzusetzen, gleichzeitig aber ist die

Wahrscheinlichkeit, daß sie Neutronen absorbieren, sehr klein. Die geringe Absorption beruht direkt auf der Struktur des Kohlenstoffkerns, der, aus 3 Neutronenpaaren und 3 Protonenpaaren bestehend, sehr stabil ist. Die anschließend an eine Spaltung aus einem Uranklumpen emittierten schnellen Neutronen werden, ohne absorbiert zu werden, durch Kohlenstoffkerne abgebremst, bis sie schließlich die gleiche Energie wie die Kohlenstoffatome selbst, nämlich einige hundertstel Elektronenvolt, haben.

Wegen ihrer besonderen Eigenschaften erfüllen die Graphitatome einen zweifachen Zweck, sie hindern die Neutronen am Entweichen und erhöhen durch deren Abbremsung sehr stark die Wahrscheinlichkeit dafür, daß die Neutronen in dem Uran absorbiert werden. Tatsächlich ist es eine allgemeine, für fast alle Stoffe gültige Eigenschaft, daß die Neutronen mit abnehmender Geschwindigkeit immer leichter absorbiert werden. Ein Neutron in einer solchen Kombination von Uran und Graphit lebt bedeutend länger als in einem Klumpen reinem U^{235}, der Fall, den wir bereits diskutierten. Seine mittlere *Lebenszeit* in dem Pile ist ungefähr 1 tausendstel Sekunde, anstatt einiger milliardstel Sekunden, wie in reinem U^{235}. Für die besprochene Materialanhäufung gibt es ebenso wie für das reine U^{235} unseres Gedankenexperimentes eine kritische Größe. Für den *natürlichen Uran-Graphit-Reaktor* des Jahres 1942 betrug aber diese Größe etwa 4,6 Meter, an Stelle einiger Zentimeter. Ein Vorteil dieser erheblichen Größe ist, daß man sie leicht variieren, also ohne Gefahr einen Reaktor herstellen kann, dessen Vermehrungsfaktor nur wenig über 1 liegt. Die Leistung läßt sich also leicht regeln, und die Gefahr einer Explosion ist sehr klein.

Während die Graphit- und Uranblöcke des ersten Piles aufgehäuft wurden, stieg die mit geeigneten Instrumenten gemessene Neutronenintensität allmählich an, bis beim Erreichen des kritischen Zustandes die Kettenreaktion einsetzte. Zu diesem Zeitpunkt war der Vermehrungsfaktor größer als 1, aber um viel weniger als 1 Prozent, die Kettenreaktion konnte also, bevor die Leistung gefährlich groß wurde, leicht abgestellt werden.

Das Abstellen der Kettenreaktion, also eine Verkleinerung des Vermehrungsfaktors unter 1, geschah sehr einfach durch

das Hineinstoßen eines langen, etwas borhaltigen Stahlstabes in die Anordnung. Da die Borkerne in starkem Maß Neutronen absorbieren, werden von jeder Generation genügend Neutronen absorbiert, um den Vermehrungsfaktor unter 1 zu verkleinern. Man fand, daß die *Leistung* des Piles nach der Einführung eines Stabes sehr schnell abfällt. Der Stab wird als *Regelstab* bezeichnet. Die Regelung der Leistung des Piles erreichte man sehr leicht durch Bewegen des Regelstabes. Je weniger weit der Regelstab in die Anordnung hineinreichte, um so höher stieg die Leistung des Reaktors. Durch geeignete Bewegungen des Regelstabes konnte man jede gewünschte Leistung, z. B. 1 Watt, 1000 Watt oder sogar höhere Leistungen, einstellen.

Weil diesen ersten Pile keine Abschirmung umgab, welche die bei der Spaltung auftretende gefährliche Strahlung absorbiert hätte, war es nicht ratsam, ihn bei hoher Leistung zu betreiben. Trotz der niedrigen Leistung wurde der Zweck dieses ersten Piles voll erreicht. Es war nicht geplant, mit ihm große Leistungen zu erzeugen, sondern er sollte nur zeigen, daß eine Kettenreaktion möglich ist, und das Studium einiger ihrer wichtigsten Grundlagen erlauben.

In der Tat wurden, aufbauend auf der Errichtung dieses ersten Piles, gleich anschließend die großen, gut abgeschirmten Piles oder Kernreaktoren in Hanford, Washington, gebaut. Obwohl diese Kernreaktoren bei einer Leistung von vielen Millionen Watt arbeiteten, waren sie nicht zur Erzeugung elektrischer Energie bestimmt, sondern man benutzte die in ihnen vorhandene starke Neutronenintensität zur Herstellung des neuen Elementes Plutonium, das entsteht, wenn ein U^{238}-Kern ein Neutron absorbiert. Das Plutonium sollte zur Herstellung von Atombomben verwendet werden, es ist für diesen Zweck genauso geeignet und zeigt auch fast das gleiche Verhalten wie U^{235}. Bezüglich der Grundlagen der Kettenreaktion und der Atombombe bestehen sehr wenig Unterschiede zwischen U^{235} und Pu^{239}. Wegen der möglichen Wichtigkeit des Pu^{239} als Brennstoff für viele, die Erzeugung elektrischer und mechanischer Energie betreffende Anwendungen der Atomenergie werden wir im nächsten Kapitel auf die Herstellung des Plutoniums in Kernreaktoren zurückkommen.

Trotz der niedrigen Leistung, des Fehlens einer Kühlung zum Abführen der Wärmeenergie und eines Strahlenschutzes war die Inbetriebnahme des ersten Piles im Dezember 1942 ein dramatisches Ereignis, das die Kernenergie in die Welt einführte.

Einfache Pile-Theorie

Bevor wir den ersten Pile verlassen, ist es angebracht, daß wir einige einfache Grundlagen seiner Arbeitsweise untersuchen. Zur Zeit werden so viele sehr verschiedene Arten von Kernreaktoren entworfen, daß es etwas verwirrend ist, sie zu betrachten und zu versuchen, die gemeinsamen, einfachen Grundlagen aller Typen zu erkennen und zu verstehen. Ob sie zur Gewinnung von Plutonium, der Antriebskraft eines Unterseebootes, der Elektrizität für eine Stadt oder von Radioisotopen für die Forschung verwendet werden, die wirksamen Grundlagen sind immer die gleichen. Diese Grundlagen wollen wir am Beispiel des ersten einfachen Piles untersuchen, der durch die Verwendung von natürlichem Uran, Graphit und langsamen Neutronen charakterisiert ist. Es ist fast verwunderlich, daß der natürliche Uran-Pile überhaupt arbeitet. Wie bereits besprochen, ist eine Kettenreaktion in natürlichem Uran allein nicht möglich. Erst wenn das Uran in Form von Blöcken in einem *Bremsmittel* untergebracht wird, wobei die Blöcke den richtigen Abstand haben müssen, kann eine Kettenreaktion stattfinden. Außerdem müssen das Uran und der Graphit in einem geradezu phantastischen Maß gereinigt sein. Die Graphitindustrie mußte während des Krieges lernen, Graphit von bis dahin unvorstellbarer Reinheit herzustellen. Die Reinigung ist notwendig, um eine Absorption der Neutronen im Graphit zu vermeiden, was zur Folge hätte, daß der Vermehrungsfaktor unter 1 absinkt und eine Kettenreaktion unmöglich ist. Die gleichen Bedingungen gelten für das Uranmetall; einige Verunreinigungen, wie z. B. Bor, mußten so niedrig gehalten werden, daß je Million Uranatome weniger als ein Atom der Verunreinigung vorhanden ist.

Eine kurze Betrachtung der Lebensgeschichte eines Neu-

trons, vom Moment seines Eintritts in einen Uranblock bis zum Eintritt eines seiner Nachkommen in einen anderen Uranblock, wird uns helfen, das empfindliche Gleichgewicht der vielen Faktoren zu verstehen, dessen geeignete Einstellung zum Erreichen der ersten Kettenreaktion notwendig war. Tritt ein langsames Neutron in einen Urankern ein und stirbt dort infolge Absorption, so *kann* es eine Spaltung (es gibt auch andere Möglichkeiten) verursachen und durch die Erzeugung mehrerer Spaltneutronen eine neue Generation ins Leben rufen. Wir haben aus Gründen der Einfachheit diese Zahl mit 3 angenommen, jetzt wollen wir aber viel genauer vorgehen. Die genaue Zahl der *im Durchschnitt* je Spaltung erzeugten Neutronen ist 2,50. Unglücklicherweise kann ein in das Uran eintretendes Neutron auch auf andere Weise umkommen, z. B. durch Absorption in dem reichlich vorhandenen U^{238}-Isotop, ein Prozeß, der zu keiner Spaltung führt. Beim Einfang durch U^{238} entsteht Plutonium (nach der Emission von 2 Betateilchen), aber dieser Prozeß trägt nicht zur Kettenreaktion bei. Durch die Konkurrenz zwischen den Prozessen, die ein Neutron erleiden kann, werden für jedes in dem Uranklumpen absorbierte Neutron nur 1,35 Neutronen erzeugt, also weniger als die 2,50 je Spaltung entstehenden Neutronen. Die Zahl 1,35 ist die Größe der wichtigen Konstanten η des griechischen Buchstabens „Eta", die besonders für Reaktoren mit natürlichem Uran von großer Bedeutung ist. Sie ist definiert als die durchschnittliche Anzahl der Neutronen, die pro im Uran absorbiertem Neutron emittiert werden. Verlassen die schnellen Spaltneutronen den Uranklumpen, so nimmt ihre Anzahl etwas zu, denn einige von ihnen verursachen in dem reichlich vorhandenen U^{238}-Isotop Kernspaltungen. Dieser Effekt vergrößert die Zahl der austretenden Neutronen um etwa 5 Prozent (der *Schnellvermehrungsfaktor*, durch den griechischen Buchstaben „Epsilon", ε, gekennzeichnet, ist also 1,05).

Bewegen sich die schnellen Neutronen durch den Graphit, so nimmt ihre Energie durch Zusammenstöße mit Kohlenstoffkernen schnell ab. Die Abbremsung der Neutronen hat den Vorteil, daß die Wahrscheinlichkeit ihrer Wechselwirkung mit Materie mit abnehmender Geschwindigkeit zunimmt. Der

Nachteil ist, daß sie bei ihrer Abbremsung von verschiedenen Atomen in unerwünschter Weise absorbiert werden können, am stärksten durch U^{238}-Kerne; um diese Art der Absorption zu verringern, ordnet man das Uran in Form von Klumpen an. Der Grund für die Wirksamkeit dieser Anordnung liegt in der besonderen Art des Einfanges in U^{238}, die zur Folge hat, daß bei einem Uranklumpen nur eine dünne Oberflächen-

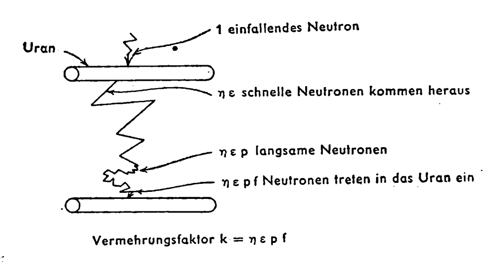


Fig. 15. Die Lebensgeschichte der Neutronen in einem thermischen Reaktor, d. h. in einem Reaktor, in dem der Großteil der Kernspaltungen durch langsame (thermische) Neutronen ausgelöst wird.

schicht, nicht aber das ganze übrige Volumen absorbiert. Diese Wirkung auf schnelle Neutronen ist von der auf langsame Neutronen sehr verschieden, letztere durchdringen die Oberflächenschicht leicht. Die Wahrscheinlichkeit, daß ein Neutron erfolgreich abgebremst wird und dem *Resonanzeinfang* entgeht, beträgt ungefähr 87 Prozent, diesen Faktor p bezeichnet man als *Lebenserwartung.* Hier sehen wir einen der Vorteile, die der Gebrauch von angereichertem Uran (der U^{235}-Anteil ist größer als in natürlichem Uran) in einem Kernreaktor mit sich bringt. Für reines U^{235} z. B. würde p den Wert 1 annehmen, abgesehen von der geringen Absorption in den Baumaterialien des Reaktors, die sich aber durch geeignete Wahl der Materialien praktisch bedeutungslos klein halten läßt. In der Lebensgeschichte des Neutrons haben wir zu diesem Zeitpunkt $\eta\varepsilon p$ erfolgreich abgebremste Neutronen für ein ursprünglich im Uran absorbiertes Neutron. Das Produkt liegt gut über 1 ($1{,}35 \times 1{,}05 \times 0{,}87 = 1{,}23$), stellt aber leider noch

nicht den Vermehrungsfaktor dar; einige der langsamen Neutronen können nämlich durch Kohlenstoffkerne absorbiert werden und erreichen dann den Uranklumpen überhaupt nicht. Der Bruchteil der Neutronen, die das Uran erreichen, beträgt etwa 85 Prozent und wird als *thermischer Verwertungsgrad* f bezeichnet. So erhalten wir schließlich für die Größe des stets mit k bezeichneten *Vermehrungsfaktors* einen Wert von

$$k = \eta \varepsilon p f,$$

mit den von uns angegebenen Werten ergibt sich 1,23×0,85 oder 1,05. Der Vermehrungsfaktor liegt also kaum über 1, obgleich äußerst reine Materialien benützt werden und ihre Größe und geometrische Anordnung optimal gewählt wurden. Die eben beschriebene Lebensgeschichte des Neutrons wird in Fig. 15 zeichnerisch nochmals dargestellt.

Bisher haben wir nichts darüber gesagt, daß Neutronen aus dem Reaktor entweichen können. Der Wert von 1,05 für k ist nur für einen unendlich großen Reaktor gültig, andernfalls entweichen ja einige Neutronen und verursachen so eine Verkleinerung von k. Der wirkliche Reaktor muß so gebaut werden, daß nicht mehr als 5 Prozent der Neutronen entweichen, sonst kann keine Kettenreaktion erreicht werden. Beträgt der Verlust durch Entweichen gerade 5 Prozent, so ist die Zahl der Neutronen in jeder Generation gleich groß wie in der vorhergehenden Generation. Um den Verlust kleiner als 5 Prozent zu halten, muß der Reaktor recht groß sein, etwa 4,6 Meter von Seite zu Seite. Das ist die minimale Größe eines Reaktors bei der Verwendung reiner Materialien. Sind ein Kühlmittel und Baumaterialien vorhanden, so absorbieren diese Neutronen, und der Neutronenverlust durch Entweichen muß noch kleiner und daher der Reaktor noch größer gemacht werden. Mit so kleinen Werten der *Überschußempfindlichkeit* (der Überschuß des Vermehrungsfaktors über 1 oder k −1) ist die Berücksichtigung wichtiger technischer Gesichtspunkte, wie große Festigkeit der Baumaterialien und genügend Kühlmittel, um große Energiemengen abführen zu können, sehr schwierig. Aus diesen Gründen sind dem natürlichen Uran-Graphit-Reaktor in technischer Hinsicht strenge Grenzen gezogen, im übrigen ist er immer sehr groß.

Überblick über die Grundlagen der geregelten Kettenreaktion

In diesem Kapitel haben wir viel über die Grundlagen der Kettenreaktion erfahren, Grundlagen, die Anwendung finden, gleich, ob die Kettenreaktion in einer millionstel Sekunde in reinem U^{235} oder Pu^{239} stattfindet, es sich also um die Explosion einer Atombombe handelt, oder ob sie in einem großen Graphit-Uran-Pile, mit einem Vermehrungsfaktor kaum größer als 1, vor sich geht. Damit wir den Zusammenhang der ganzen Darstellung nicht verlieren, ist es vielleicht gut, wenn wir uns kurz den grundsätzlichen Vorgang der Kernspaltung ins Gedächtnis zurückrufen, denn dieser Vorgang, unbeschränkt fortgesetzt, *bildet* ja die Kettenreaktion.

Die Kernspaltung ist eine besonders heftige Kernumwandlung, bei der Masse verschwindet. An Stelle der verschwindenden Masse entsteht eine Energiemenge, deren Größe aus der Einsteinschen Gleichung berechnet werden kann; sie tritt in Form der Bewegungsenergie der auseinanderfliegenden Spaltbruchstücke auf. Außer den Bruchstücken entstehen bei der Kernspaltung die für das Eintreten einer Kettenreaktion so wichtigen Neutronen; sie bilden eine starke Strahlungsquelle, die im Inneren des Reaktors und auch außerhalb der Abschirmung vielfache Anwendungen findet.

Den großen Energieüberschuß und die damit verbundene Instabilität der Spaltbruchstücke zeigen nicht nur die emittierten Neutronen, sondern auch die emittierten Gammastrahlen und Betateilchen. Wie wir erfahren haben, ist die Gammastrahlung eine Wellenstrahlung mit kleiner Wellenlänge, ähnlich der Röntgenstrahlung, und die Betateilchen sind Elektronen, die sich mit großer Geschwindigkeit bewegen. Die Bewegungsenergie der Spaltbruchstücke, die gewöhnlich in festem Material, meist Uranmetall, entstehen, wird beim Aufprall auf die umgebenden Atome bald in *Wärmeenergie* verwandelt. Die Energie der zufälligen Bewegung der Uranatome ist einfach die Wärmeenergie, ihre durch die Zusammenstöße erfolgende Vergrößerung äußert sich in einer Zunahme der Temperatur.

In praktischer Hinsicht sind die drei unmittelbaren Folgen der Kettenreaktion 1. Wärmeenergie, 2. Beta- und Gamma-

strahlung und 3. Neutronen, und zwar in jedem Fall, ganz gleich, ob die Kettenreaktion in Bomben oder Kernreaktoren stattfindet. Diese Produkte stehen der Menschheit zur Verfügung, unabhängig davon, ob sie zur Vernichtung oder nutzbringend gebraucht werden. Erfolgt die Freisetzung einer großen Menge Wärmeenergie plötzlich, so gibt es eine Explosion, erfolgt sie aber geregelt und dient sie zur Erzeugung von Hochdruckdampf, so können fast unbegrenzte Mengen elektrischer Energie gewonnen werden. Liegen die Spaltprodukte in Form des bei einer Bombenexplosion entstehenden Niederschlages vor, so kann ihre Strahlung Tausende von Menschen töten oder verkrüppeln, die gleiche Strahlung kann aber für die Forschung oder noch unmittelbarer für die Krebsbehandlung verwendet werden. Die bei einer Bombenexplosion entstehenden Neutronen wirken tödlich, die gleichen Neutronen, in geregelter Weise freigesetzt, ermöglichen uns die Erforschung zahlreicher Geheimnisse der inneren Struktur der Materie oder auch die Zerstörung kranken Gewebes im menschlichen Körper.

Diese in den beiden vorhergehenden Kapiteln behandelten Grundlagen jeder Kettenreaktion ermöglichen uns, in den folgenden Kapiteln einzusehen, daß schon die drei Produkte der Kettenreaktion zeigen, daß die Atomenergie für den friedlichen Fortschritt der Menschheit ein mächtiges Werkzeug bilden kann. Wärmeenergie, Neutronen und Strahlung dienen in immer größerem Maße dem allgemeinen materiellen Nutzen der Menschheit. Im Rahmen einer umfassenderen Sicht liegt vielleicht eine noch größere Bedeutung in der Möglichkeit, daß die Zusammenarbeit zur Förderung des materiellen Nutzens der Atomenergie zu einem internationalen Verstehen in der breiten politischen Sphäre führen könnte.

IV

ATOMKRAFT

> In dem langen Lauf der Menschheitsgeschichte scheint mir die wahre, große Bedeutung der Kernenergie die einer Quelle für nutzbringende Wärme und Kraft zu sein. In dieser Hinsicht kann die endgültige Bedeutung für die Menschheit kaum geringer als die des Feuers sein.
>
> *A. H. Compton, Atomic Quest*
> *(Oxford University Press, New York, 1956)*

Wir haben gesehen, daß bei jeder Kettenreaktion drei Produkte entstehen — Wärme, Strahlung und Neutronen. Von diesen ist der Wärme bei weitem das größte öffentliche Interesse zuteil geworden, denn es ist die bei einer Kettenreaktion entstehende Wärmeenergie, die umgeformt in mechanische Energie die Atom-U-Boote „Nautilus" und „Seewolf" antreibt, die eines Tages Flugzeuge und Raketen antreiben kann und die bereits viele tausend Kilowatt elektrischer Leistung liefert. Seit die erste Atombombe die ganze Welt auf die Atomenergie aufmerksam machte, sagt man uns unaufhörlich, daß wir heute im Zeitalter der Atomkraft leben. Dabei werden über die Atomenergie so oft übertriebene Aussagen gemacht, daß es dem Laien schwerfällt, unsere Beziehungen zum „Atomzeitalter" richtig zu beurteilen. Er kann zwar leicht extreme, um der Sensation willen geschriebene Darstellungen als solche erkennen, aber einen richtigen Einblick in die Möglichkeiten und Probleme kann er nur bei Kenntnis einiger wichtiger fachlicher Grundlagen erhalten.

Die bisher dargestellten Grundlagen der Atomenergie erlauben uns festzustellen, wie weit wir in das Zeitalter der Atomkraft eingetreten sind, wieviel Atomkraft verfügbar ist, wie sie erzeugt wird und schließlich, was sie kostet. Der letzte, die Wirtschaftlichkeit betreffende Punkt ist wesentlich, denn trotz der Unbegrenztheit der Atomenergie muß sie auf dem

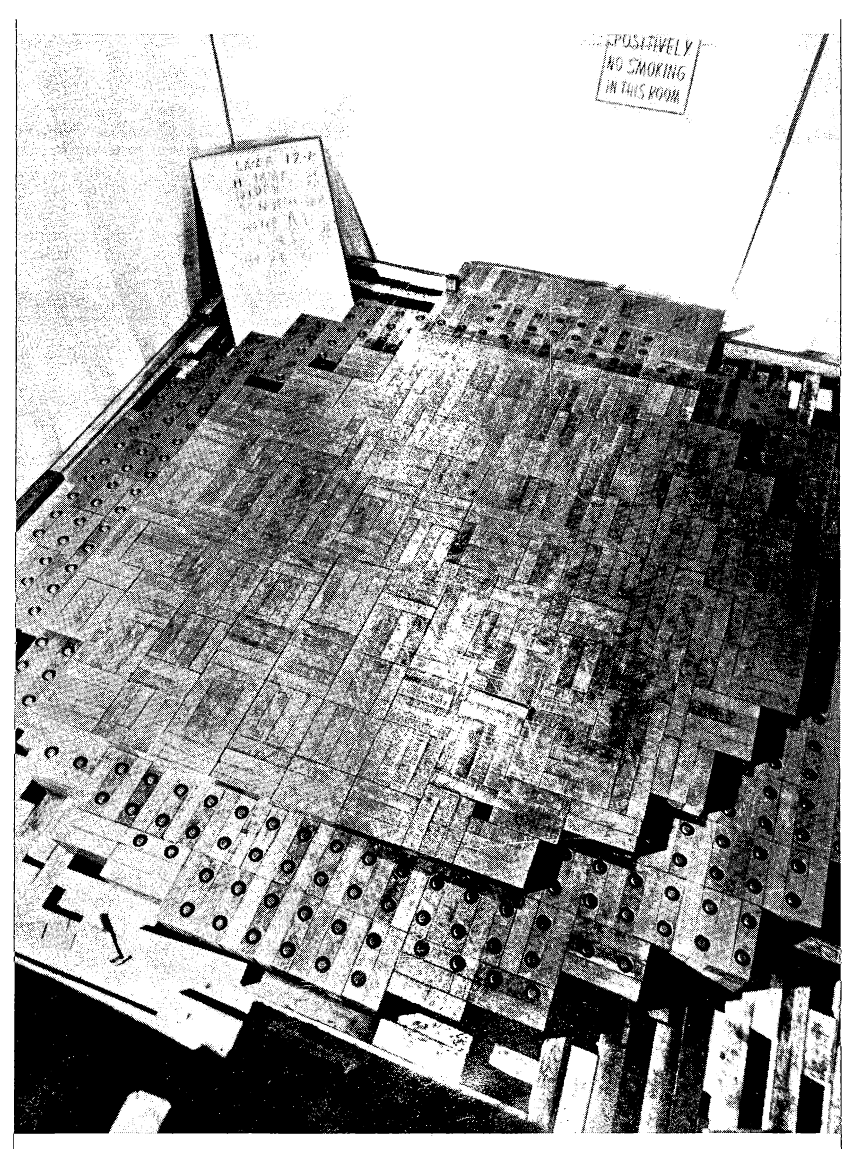


Fig. 14. Das Bild zeigt den im Aufbau befindlichen Pile, in dem später die erste Kettenreaktion stattfand. Man sieht die verschiedenen Lagen von Graphitziegeln und die in Bohrungen untergebrachten Uranstücke.

Fig. 17. Das Schema der Gewinnung elektrischer Energie mit einem Reaktor. Die im Reaktor entstehende Wärmeenergie wird von einem Kühlmittel, hier ein Gas, aufgenommen und im Wärmeaustauscher (Mitte des Bildes) zur Dampferzeugung verwendet. Der Dampf treibt eine Turbine und diese einen Stromerzeuger (rechts) an.

Fig. 19. Die Gesamtansicht des in Shippingport, Pennsylvania, gebauten Atomkraftwerkes.

Markt wettbewerbsfähig sein, wenn sie ein wichtiger Teil unseres industriellen Lebens werden soll. Diese praktischen Fragen sind unmittelbar von den Grundlagen der Kernspaltung und der Kettenreaktion abhängig. Um den wahrscheinlichen Platz der Atomkraft in unserem jetzigen und zukünftigen Leben richtig abzuschätzen, braucht man diesen Grundlagen nur noch einige Kenntnisse hinzuzufügen über die praktische Verwertung der Kettenreaktion zur Gewinnung mechanischer oder elektrischer Energie.

Die durch die Kernspaltung verfügbare Energie

Betrachten wir die Verwendung von Materie zur Energiegewinnung mit Hilfe des Vorganges der Kernspaltung, so müssen wir als erste Frage stellen: wieviel Atomenergie ist verfügbar? Es wäre sinnlos, von dieser neuen Energiequelle viel Aufhebens zu machen, wenn sie ungeheuere Mengen Uran erfordern würde. Als 1939 die Kernspaltung entdeckt wurde, wußte man über die Menge des verfügbaren Urans wenig. Wären Uranvorkommen ziemlich selten, so bestünde noch weniger Grund zum Optimismus.

In diesem Fall können wir aber die Antwort fast sofort geben: auch wenn Uran selten wäre, könnte ungeheuer viel Atomenergie erzeugt werden. Diese Antwort ist uns möglich, wenn wir uns erinnern, daß die mit Kernumwandlungen verbundenen Energiemengen millionenmal größer sind als die bei chemischen Umwandlungen, wie der Verbrennung von Öl oder Kohle. Kernumwandlungen, bei denen Masse in Energie verwandelt wird, deren Größe sich aus der Einsteinschen Gleichung berechnen läßt, können aus dem Uran unglaublich große Energiemengen freisetzen. Wie wir bereits erfahren haben, verschwinden bei der Spaltung eines Urankerns nur etwa 0,1 Prozent seiner Masse. Die dabei auftretende Energie ist aber in Übereinstimmung mit Einsteins Gleichung, in der ja die sehr große, das Quadrat der Lichtgeschwindigkeit darstellende Zahl vorkommt, keineswegs klein.

Wir betrachteten in Kapitel 3, wie man aus Berechnungen, die auf der Einsteinschen Gleichung beruhen, annehmen kann,

daß bei der Spaltung eine große Energiemenge freigesetzt wird. So ergibt sich, wenn *alle* in 1 Kilogramm Uran enthaltenen Atome gespalten werden, durch Addition der je Kernspaltung eines Urankerns freigesetzten 200 Millionen Elektronenvolt eine kaum vorstellbare Energiemenge. Das Ergebnis wird noch eindrucksvoller, wenn man sich vorstellt, daß 1 Kilogramm Uran ein Würfel von nur etwa 3,7 Zentimeter Kantenlänge ist. Dieser kleine Uranwürfel verliert nur ein Tausendstel seiner Masse, also 1 Gramm, wenn alle seine Atome spalten. Dieser winzige Massenverlust entspricht einer Energiemenge von 25 Millionen Kilowattstunden, um die für die elektrische Energie übliche Einheit zu gebrauchen. Diese elektrische Energie ist ungefähr 1,1 Millionen Dollar wert, wenn wir den in einem amerikanischen Haushalt für elektrische Energie bezahlten Preis zugrunde legen. In anderen Einheiten ist die aus 1 Kilogramm Uran entstehende Energie gleich der durch die Verbrennung von 2,8 Millionen Litern Benzin oder 2500 Tonnen Kohle erzeugten Energie. Es ist nicht verwunderlich, daß durch die Aussicht auf solche Energiemengen, die sich aus der Vernichtung von nur 1 Gramm Masse ergeben, die Einbildungskraft angeregt wird.

Obwohl man sich diese Energieäquivalente schwer vorstellen kann, bilden sie doch keine unsichere, in der Zukunft liegende Verheißung. Sie sind eine zwangsläufige Folge des bei der Kernspaltung auftretenden Massenverlustes, und für alle heute stattfindenden Kettenreaktionen liefern sie die Energieausbeute. In kleinen Brennstoffstücken ist also eine außerordentlich große Menge Atomenergie verfügbar. Die Ergiebigkeit der Kernbrennstoffe ist von größter Wichtigkeit für die Energiegewinnung in entlegenen Gegenden, in denen Öl und Kohle nicht vorkommen. Tatsächlich ist, wie wir später sehen werden, gerade in solchen Gegenden die baldige Erzeugung elektrischer Energie aus Atomen am wahrscheinlichsten.

Wir brauchen uns über das insgesamt verfügbare Uran keine Sorgen zu machen. Vor der Entdeckung der Kernspaltung wurde nach Uran nicht viel gesucht, denn es hatte zu dieser Zeit relativ wenig Bedeutung. Seit damals wurde aber durch intensives Suchen immer mehr Uran gefunden, und heute entsprechen die bekannten, verwertbaren Vorkommen

an Uran (und Thorium, das, wie wir sehen werden, als Quelle für Kernbrennstoff geeignet ist) energiemäßig etwa der zehnfachen Menge an bekannten, verwertbaren Vorkommen an Öl, Gas und Kohle. Wir brauchen uns also über das Vorhandensein von Kernbrennstoffen noch sehr lange Zeit kaum Gedanken zu machen. Sollten uns außerdem jemals die Kernbrennstoffe ausgehen, so könnten wir zu diesem fernen Zeitpunkt wahrscheinlich den reichlich vorhandenen schweren Wasserstoff zur Kernverschmelzung verwenden. Es ist aber angebracht, diese Möglichkeit erst im letzten Kapitel zu betrachten, weil ihre Verwirklichung noch in der fernen Zukunft liegt.

Der erste Schritt in der Energiegewinnung — die Wärme

Es ist klar, daß selbst aus kleinen Uranstücken viel Energie erzeugt werden kann, die sich, zumindest theoretisch, in Bewegungsenergie oder elektrische Energie umformen läßt. Offensichtlich müssen wir uns jetzt damit befassen, wie sich die mit Hilfe der Einsteinschen Gleichung berechenbare Energie in die praktisch üblichen Energieformen umwandeln läßt, z. B. in die durch eine Leitung übertragbare elektrische Energie oder in den Hochdruckdampf, der die Turbinen eines U-Bootes antreibt. Die sich aus Einsteins Gleichung ergebende Energie erscheint bei der Kernspaltung als die Bewegungsenergie der Bruchstücke des Urankerns, der sich schnell bewegenden *Spaltbruchstücke.* Bewegen sich diese Spaltbruchstücke durch einen festen Stoff, so wird ihre Energie bald in Wärmeenergie verwandelt. Finden in dem Stoff viele Kernspaltungen statt, so erreicht er schnell eine hohe Temperatur. Gegenwärtig sind alle praktischen Arten der Energiegewinnung aus der Spaltung mit einem Zwischenprozeß verbunden, bei dem eine heiße Substanz zur Übertragung der Wärmeenergie dient; mit anderen Worten, man verwandelt die Bewegungsenergie der Spaltbruchstücke stets zuerst in Wärmeenergie. Eine grundlegende Tatsache der Energiegewinnung ist, daß die Umwandlung von Wärmeenergie in elektrische Energie mit schlechtem Wirkungsgrad erfolgt; tatsächlich gehen zwei Drittel der Ener-

gie oder mehr bei der Umwandlung verloren. Es ist ein verlockender Gedanke, daß man die Bewegungsenergie der Spaltbruchstücke vielleicht *unmittelbar* in elektrische Energie umwandeln könnte, also ohne den Zwischenprozeß der Erwärmung einer Substanz. Im Prinzip ist diese direkte Umwandlung von Kernenergie in elektrische Energie möglich, aber die Schwierigkeiten sind so groß, daß diese Möglichkeit gegenwärtig nicht ernstlich erwogen wird.

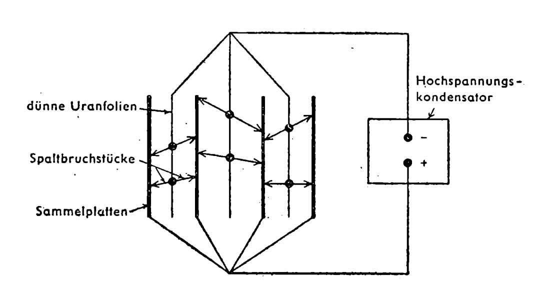


Fig. 16. Eine Methode, mit der im Prinzip die Bewegungsenergie der Spaltbruchstücke direkt in elektrische Energie umgeformt werden kann. Die im Text erklärten Schwierigkeiten machen die praktische Durchführung dieses Verfahrens unmöglich.

In der abgebildeten Zeichnung (Fig. 16) zeigen wir, wieder „im Prinzip", wie diese direkte Umwandlung von Spaltungsenergie in elektrische Energie erreicht werden könnte. Das für die Kernspaltung benützte Uran liegt in Form einer sehr dünnen Schicht vor, aus der die Spaltbruchstücke austreten, bevor ihre Bewegungsenergie in Wärmeenergie verwandelt worden ist. Die Bruchstücke sind positiv geladen, weil sie während der heftigen Spaltung einige der sie umgebenden Elektronen verlieren. So werden die Metallplatten, auf welche die Bruchstücke auftreffen, bald positiv geladen, während die dünnen Folien, aus denen die Bruchstücke kommen, negativ geladen werden. Die Platten und die Folien werden mit jeweils einem Anschluß eines großen Kondensators, außerhalb des

Reaktors, verbunden. Die elektrische Ladung der Platten und Folien wird also dem Kondensator zugeleitet und in ihm gespeichert, so daß dieser eine Quelle elektrischer Energie bildet mit einer sehr hohen Spannung von vielen Millionen Volt. Auf diese Weise würde also die Energie der Spaltbruchstücke direkt in elektrische Energie umgeformt werden, und zwar nicht nur etwa ein Drittel, sondern ihre *gesamte* Energie. Würde die elektrische Ladung zu äußerer Arbeitsleistung benützt, also dem Kondensator Ladung entnommen, so würde diese durch die von den Spaltbruchstücken transportierten elektrischen Ladungen ersetzt werden. Dieser Reaktortyp hätte den großen Vorteil, keine Wärme zu erzeugen.

Die Schwierigkeit dieser einfachen Idee besteht darin, daß die Folien, um den Austritt der Bruchstücke zu ermöglichen, äußerst dünn sein müssen, so dünn, daß sie nicht genügend Uran enthalten würden, um eine Kettenreaktion zu ermöglichen, außer man würde viele Tausende solcher Folien gleichzeitig benützen. Auch wäre, um bei der Spannungsdifferenz von vielen Millionen Volt einen Ladungsverlust des Kondensators zu vermeiden, eine sehr gute elektrische Isolation nötig. Der Raum zwischen den Folien und Platten müßte luftleer sein, um eine freie Bewegung der Spaltbruchstücke zu gewährleisten. Diese Schwierigkeiten sind so groß, daß kein ernster Versuch unternommen wird, eine direkte Umwandlung von Spaltungsenergie in elektrische Energie zu erreichen. Die gesamte, bisher für die Energiegewinnung durchgeführte Arbeit ist durch die übliche Verwendung eines heißen Stoffes zur Wärmeübertragung gekennzeichnet. In Form von Wärme wurde in den Vereinigten Staaten schon sehr viel Atomenergie erzeugt, hauptsächlich mit den großen Kernreaktoren in Hanford, Washington. Diese Reaktoren arbeiten bei Leistungen, die noch geheimgehalten werden, die aber sicher jeweils über 100 000 Kilowatt liegen. Die Wärmeenergie wird jedoch nicht zur Erzeugung elektrischer Energie benützt. Der Zweck dieser großen Kernreaktoren ist die Herstellung von Plutonium aus U^{238}; das Plutonium ist gegenwärtig für die Verwendung in Atombomben bestimmt. Die starke Wärmeentwicklung der Reaktoren ist bis heute nur ein Abfallprodukt; die Wärmeenergie wird durch Wasser abgeführt, das mit großer

Geschwindigkeit und unter hohem Druck an den Uranstäben vorbeiströmt. Die durch das Kühlwasser aus dem Reaktor abgeführte Leistung von Hunderttausenden von Kilowatt findet keine nützliche Anwendung. Das Ergebnis bezüglich der Leistung besteht lediglich darin, daß die Temperatur des Columbiaflusses unterhalb der Anlage von Hanford den Bruchteil eines Grades höher ist als oberhalb derselben. Es wird also sehr viel Wärme erzeugt, die aber keine nutzbringende Verwendung erfährt.

Die Notwendigkeit hoher Temperaturen in Reaktoren

Wie müssen wir vorgehen, wenn wir die Wärmeenergie zur Erzeugung von Bewegungsenergie oder elektrischer Energie benützen wollen? In gewisser Hinsicht ist das Problem einfach, weil die Methoden der Umformung von Wärmeenergie in andere Energiearten im Verlauf vieler Jahre gründlich untersucht wurden. Ob das Erhitzen von Wasser und seine Umwandlung in Dampf durch die bei der Kernspaltung freigesetzte Energie oder einfach durch das Verbrennen von Kohle erfolgen, die Verwendung des Dampfes zum Antrieb eines Generators (Stromerzeugers) bleibt die gleiche. Ein Atomkraftwerk erfordert aber bei weitem mehr als die Verbindung eines Hanford-Reaktors mit der Stromerzeugungsanlage eines gewöhnlichen Kohlekraftwerkes; in der Hauptsache deswegen, weil das heiße Wasser eines Hanford-Reaktors kein sehr wirksames Mittel ist, um ein Kraftwerk zu betreiben. Was man benötigt, ist ein Kühlmittel, das auf bedeutend höhere Temperatur gebracht werden kann, eine Temperatur, die genügt, um Dampf von hoher Temperatur und damit hohem Druck zu erzeugen, dieser Dampf treibt eine Turbine und diese einen Generator, wie es in Fig. 17 (Tafel) skizziert ist.

Der Stoff, der die Wärmeenergie aus dem Reaktor wegschafft, also das *Kühlmittel*, kann durch eine Erhöhung der Leistung des Reaktors auf höhere Temperatur gebracht werden. Die Vergrößerung der Reaktorleistung geschieht sehr einfach mit Hilfe der Regelstäbe, sie wird aber durch die natürlichen Grenzen der Beständigkeit der verschiedenen Materialien gegen-

über hohen Temperaturen bald ernstlich begrenzt. Zum Beispiel ändert das Uranmetall bei zu hoher Temperatur seine Form; die sich daraus ergebende Verformung der *Brennstoffstäbe* kann beim Betrieb des Reaktors ernste mechanische Schwierigkeiten ergeben.

Außerdem müssen die Uranstäbe mit einer Schutzschicht überzogen werden, so daß keine Spaltbruchstücke in den Kühlmittelkreislauf gelangen können. Wegen der starken Radioaktivität der Spaltbruchstücke sollen diese nicht in das Kühlmittel gelangen, weil sie dann die ganze Anlage durchströmen und für das Bedienungspersonal eine absolute Gefahr bilden. Eine der größten derzeitigen Schwierigkeiten in der Atomenergieindustrie bildet die Herstellung eines Schutzüberzuges für die Uranstäbe aus einem Material, das hohe Temperaturen aushält. Aber auf diesem Gebiet ist viel gearbeitet worden, und in neuen Reaktoren können heute hohe Temperaturen erreicht werden. Neben Wasser werden auch andere Kühlmittel benützt, aber, wie wir erfahren werden, nicht in Reaktoren mit natürlichem Uran, weil diese Kühlmittel zwar die gewünschten Wärmeübertragungseigenschaften besitzen, aber zu viele Neutronen absorbieren. Benützt man in einem Reaktor angereichertes Uran, das einen größeren U^{235}-Anteil aufweist als natürliches Uran, so können auch die anderen Kühlmittel Verwendung finden.

Das Problem der Abschirmung

Unter der Annahme, daß ein Kühlmittel genügend erhitzt werden kann, um mit gutem Wirkungsgrad elektrische Energie erzeugen zu können, wollen wir sehen, welche Probleme bei der Energiegewinnung aus Atomen sonst noch vorhanden sind. Die Faktoren, die im Vergleich zu den üblichen Methoden zusätzlich berücksichtigt werden müssen, ergeben sich aus den zwei anderen, zwangsläufig mit der Kettenreaktion verbundenen Produkten — den Neutronen und der Strahlung. Sowohl die Neutronen, als auch die Strahlung, vor allem die Gammastrahlung, sind bei der Stärke, wie sie für Reaktoren hoher Leistung typisch ist, äußerst gefährlich. Wegen der

damit verbundenen Gefahr wäre es völlig unmöglich, einen Reaktor zu betreiben, ohne diesen mit einer schützenden *Abschirmung* zu umgeben. Die verwendeten schweren Abschirmungen schränken die Veränderungen der Reaktortypen, die uns im Atomzeitalter zur Verfügung stehen werden, stark ein.

Bald nach Hiroshima und Nagasaki sagte man uns allen, daß unsere Autos mit Atomenergie angetrieben würden, daß winzige Atommaschinen unsere Häuser heizen und außerdem diese Dinge fast keinen Brennstoff erfordern würden. Diese verlockenden Aussichten muß man stark reduzieren, wenn man die erforderlichen Abschirmungen berücksichtigt. Vielleicht besteht der beste Weg, die Notwendigkeit und Bedeutung der Abschirmung zu erläutern, in der Betrachtung der Ausführbarkeit eines kleinen Atommotors. Es ist wahr, daß ein Atommotor gebaut werden könnte, der unter einer Autohaube Platz hat und im Jahr sicher nicht mehr als einen Eßlöffel Brennstoff verbraucht. Man müßte U^{235} benützen, um den Reaktor genügend klein zu halten, man könnte diesen mit einem Gas kühlen, das dann eine kleine Gasturbine antreibt. Betrachten wir aber die Intensität der bei der Kettenreaktion emittierten Strahlung und Neutronen, so sehen wir sehr klar, welchen wichtigen Einfluß die Abschirmung auf die Ausführbarkeit des ganzen Planes nimmt.

Die von unserem Atommotor emittierte Gammastrahlung würde der des *Radiums* sehr ähnlich sein; diese kann richtig angewandt zur erfolgreichen Behandlung von Krankheiten dienen und kann bei großer Stärke töten. Um einen Vergleich zu haben, beziehen wir uns darauf, daß das heute in allen Krankenhäusern der Welt und für sonstige Zwecke benützte Radium, alles in allem, nur etwa 2,2 Kilogramm wiegt. Wir können sehr eindrucksvoll sehen, wie stark unser Automotor hinsichtlich der Gammastrahlung ist, wenn wir die Menge der Strahlung berechnen, die er bei einer Leistung von z. B. 100 PS emittiert. Die Stärke der Strahlung entspricht der von 900 Kilogramm Radium — 900 Kilogramm, verglichen mit dem Radiumvorrat der ganzen Welt von nur 2,2 Kilogramm. Natürlich ist die von typischen großen Reaktoren emittierte Strahlung viel stärker als die von 900 Kilogramm Radium, aber in diesen Fällen wird ja die Strahlung durch die dafür

gebauten schweren Wände der Abschirmung aufgehalten. Wir könnten, um den Fahrer, die Mitfahrer und die Fußgänger zu schützen, für unseren Automotor auch eine Abschirmung bauen, aber sie würde etwa 45 Tonnen wiegen! Dies ist der Grund, warum kleine Atommotoren von der Art eines Automotors in absehbarer Zukunft nicht hergestellt werden können. Für ortsfeste Kraftwerke, auch für Ozeanschiffe, bilden große Abschirmungen keinen Nachteil, dagegen große Schwierigkeiten z. B. für Flugzeuge und eine praktisch unüberwindliche Schranke für Atomautos.

Etwas erläutert werden muß die Tatsache, daß die Abschirmungen, die um Kernreaktoren angebracht werden müssen, zwangsläufig so groß und schwer sind. Man könnte gut sagen: „Wir wissen, daß die Wissenschaftler sagen, daß die Abschirmungen schwer sind, aber sicher werden sie sich bemühen, einen Weg zu finden, wie sie die Strahlung mit einer dünnen, leichten Abschirmung aufhalten können." Leider ist die Unvermeidlichkeit schwerer Abschirmungen eines der wenigen Dinge, über die wir völlig Bescheid wissen. Die physikalischen Gesetze, die das Verhalten der Strahlung und die Wechselwirkungen, die die Absorption durch Materie verursachen, beschreiben, sind heute sehr gut bekannt. Die Wahrscheinlichkeit, daß zukünftig irgendein neuer Prozeß zur Absorption von Strahlung gefunden wird, ist im wesentlichen gleich Null. Außerdem spielt bei dem Vorgang der Absorption von Strahlung stets die Masse eine Rolle; um eine starke Absorption zu erreichen, muß man in den Gang der Strahlung einfach genügend viel schwere Kerne bringen.

Im einzelnen sind die Vorgänge bei der Absorption von Strahlung in Materie sehr kompliziert, und der Entwurf einer optimalen Abschirmung für eine bestimmte Strahlungsart ist deshalb sehr schwierig. Gegenwärtig werden ausgedehnte experimentelle und theoretische Untersuchungen durchgeführt, um die besten Arten von Abschirmungen herauszufinden, aber auch sie werden höchstens eine Verringerung des Abschirmungsgewichtes von wenigen Prozenten ermöglichen. Das bedeutet nicht, daß diese wenigen Prozente unwichtig sind für gewisse Anwendungen, z. B. kann ja bei einem Atomflugzeugmotor sogar eine kleine Verringerung des Abschirmungs-

gewichtes von höchster Wichtigkeit sein. Diese Fortschritte im Abschirmungsbau ergeben aber jedenfalls nicht die Verbesserung, die nötig wäre, um einen Atomautomotor herzustellen.

Das Gewicht der Abschirmung spielt also für die zukünftigen Möglichkeiten der Atomenergie eine bedeutende Rolle, die genau und einfach so zusammengefaßt werden kann: Der Atomautomotor ist fast unmöglich, weil er eine Abschirmung von 45 Tonnen erfordert; für ein ortsfestes Kraftwerk oder ein Ozeanschiff bringt die Abschirmung keine erheblichen Nachteile; das Gewicht der Abschirmung bildet für das Unterseeboot ein Problem, das aber, wie die erfolgreiche „Nautilus" zeigt, nicht unüberwindlich ist; für das Flugzeug ist das Gewicht der Abschirmung eines der größten Probleme, aber es scheint recht wahrscheinlich, daß der Erfolg die gegenwärtigen Bemühungen größten Ausmaßes rechtfertigt; und schließlich scheint die Atomlokomotive, wenn auch nicht unmöglich, so doch zumindest in weiter Zukunft zu liegen.

Der Uran-Graphit-Reaktor als Energiequelle

Da wir in erster Linie an der friedlichen Anwendung der Kernspaltung interessiert sind, können wir uns der Hauptanwendung, der Erzeugung von elektrischer Energie, zuwenden, bei der das Gewicht der Abschirmung keine schwerwiegende Sorge bildet. In dem bisher betrachteten Kernreaktortyp ist natürliches Uran, bei dem auf 139 Atome U^{238} ein Atom U^{235} trifft, in geeigneter Weise in dem als Bremsmittel wirkenden Graphit angeordnet. Wollten wir diese Art von Reaktor als Energiequelle benützen, so würde er wahrscheinlich den großen Reaktoren in Hanford ähneln, deren Wärmeenergie durch rasch fließendes Wasser weggeschafft wird. Gegenwärtig wird die Energieerzeugung mit einem *natürlichen Uranreaktor*, also die Verwendung des von einem Reaktor des Typs Hanford gelieferten heißen Wassers zum Antrieb von Generatoren, nicht ernstlich in Betracht gezogen, weil eine derartige Gewinnung elektrischer Energie mit einem schlechten Wirkungsgrad verbunden ist. Es ist eine wohlbekannte Tatsache, daß bei der Erzeugung elektrischer Energie aus

Wärme der *Wirkungsgrad,* also der Bruchteil der Wärmemenge, der tatsächlich in elektrische Energie umgeformt wird, sehr stark von der Temperatur des die Wärmeenergie aufnehmenden Stoffes abhängt.

Wegen dieser Temperaturabhängigkeit wurde in den Dampferzeugungsanlagen während der ganzen letzten Jahre zu immer höheren Temperaturen und damit auch zu immer höherem Dampfdruck übergegangen. Versuchten wir in unserem Reaktor des Typs Hanford Wasser von immer höherer Temperatur zu erhalten — das Kochen des Wassers müßte man durch eine ausreichende Druckerhöhung vermeiden —, würden wir bald auf Schwierigkeiten stoßen. Diese ergeben sich aus der Notwendigkeit, die Stahlleitungen, in denen das Wasser durch den Reaktor strömt, sehr stark zu machen, so daß sie den hohen Druck aushalten. Leider absorbieren die Stahlleitungen dann so viele Neutronen, daß keine Kettenreaktion mehr erreicht wird. In unserer früheren Ausdrucksweise würden wir sagen, es werden so viele Neutronen absorbiert, daß der Vermehrungsfaktor unter 1 absinkt.

Tatsächlich hat ja die Kombination von Uran und Graphit, sogar ohne fremde neutronenabsorbierende Stoffe, einen Vermehrungsfaktor von nur 1,05. Dieser niedrige Vermehrungsfaktor hat zur Folge, daß der Reaktor auch ohne Neutronenabsorber recht groß, etwa 4,6 Meter von Seite zu Seite, sein muß, damit überhaupt eine Kettenreaktion eintritt. Bei einem kleineren Reaktor entweichen mehr Neutronen, und der Verlust durch Entweichen wird größer als 5 Prozent, so daß für den von uns diskutierten Fall ($k = 1{,}05$) keine Kettenreaktion eintritt. Wollen wir aus dem Reaktor viel Wärmeenergie abführen, so benötigen wir große Mengen Kühlwasser und damit die starken, für den Transport des Kühlmittels notwendigen Leitungen. Beim Hanford-Reaktor muß die Wassermenge klein gehalten werden und in Aluminiumleitungen geführt werden, weil Stahl zuviel Neutronen absorbiert. Die Beschränkung hinsichtlich der Menge und Art von Baumaterialien und Kühlmitteln in einem natürlichen Uran-Graphit-Reaktor setzt der Größe der abführbaren Wärmeenergie und der erreichbaren Temperatur des Kühlmittels schwerwiegende Grenzen.

Es ist aber doch möglich, mit einem natürlichen Uran-Graphit-Reaktor brauchbare Energie zu gewinnen, wenn auch mit sehr niedrigem Wirkungsgrad. Selbstverständlich hat die Energiegewinnung aus einem natürlichen Uran-Graphit-Reaktor großen Anreiz, denn es ist der einzige Reaktortyp, dessen Betrieb keine abgetrennten Isotope erfordert. Abgetrennte Isotope stellen eine ungeheure Kapitalanlage dar und sind nur in einem Atomenergieprogramm verfügbar, das schon mehrere Jahre läuft.

Der erste Reaktor, der ohne Verwendung abgetrennter Isotope verwertbare Energie lieferte, war der BEPO genannte Reaktor in Harwell, England. Die meisten Reaktoren, damals bezeichnete man sie als „Piles", wurden so benannt, daß die Anfangsbuchstaben ein einprägsames Wort bildeten, in diesem Fall „British Experimental Pile", der letzte Buchstabe wurde willkürlich wegen des Wohlklangs hinzugefügt. Der BEPO ist ein Reaktor, der natürliches Uran und Graphit enthält; zur Kühlung wird durch Kanäle, welche die Uranstäbe umgeben, Luft geblasen. Die aus dem Reaktor austretende Luft wird, bevor sie in einen hohen Kamin geleitet und so in der Atmosphäre verteilt wird, durch einen *Wärmeaustauscher* geschickt, in dem sie andere Luft erwärmt; die Kühlluft selbst ist für die Weiterverwendung zu radioaktiv. Nachdem die aus dem Reaktor kommende *Primärluft* Wärme an die *Sekundärluft* abgegeben hat, strömt sie, dadurch etwas kühler geworden, in den Kamin und dann in die Atmosphäre. Die durch die radioaktive Luft aus dem Reaktor erwärmte Sekundärluft wird durch verschiedene Gebäude geleitet. Obwohl diese Methode etwas primitiv ist und nichts mit der Gewinnung von elektrischer Energie zu tun hat, ermöglicht sie doch die Heizung mehrerer großer Gebäude und eine jährliche Ersparnis von etwa 450 Tonnen Kohle. Eine ähnliche Anordnung wird jetzt in Hanford benützt, wo das heiße Wasser aus mehreren Reaktoren anderes Wasser erwärmt; die Gründe sind die gleichen wie bei dem englischen Reaktor, also hauptsächlich die Vermeidung von Radioaktivität. Das *Sekundärwasser* in Hanford ist, obgleich nicht sehr heiß, doch warm genug, um mehrere Gebäude zu heizen. Diese Verwendung der Wärmeenergie ist nur Nebensache, der Hauptzweck des Hanford-Reaktors ist

die Gewinnung von Plutonium und der des englischen Reaktors die Erzeugung von Neutronen für Forschungsaufgaben. Tatsächlich ist die nützlich verwendete Wärmeenergie viel geringer als die zum Betrieb des Reaktors erforderliche elektrische Energie, es wäre also sinnlos, mit dieser Methode in erster Linie Wärmeenergie erzeugen zu wollen.

Trotz des unvermeidlich niedrigen Wirkungsgrades der Energieerzeugung bei Verwendung eines natürlichen Uran-Graphit-Reaktors existiert jetzt ein Atomkraftwerk, das diesen Reaktortyp verwendet, und zwar das Calder-Hall-Kraftwerk in Cumberland, im nördlichen Teil Englands. Dort sind zwei Reaktoren in Betrieb, die mit dem Gas Kohlendioxyd, CO_2, gekühlt werden, das man wegen seiner äußerst geringen Neutronenabsorption benützt. Das Kohlendioxydgas wird sehr schnell durch den Reaktor gepumpt, dessen Leistung so groß ist, daß die Temperatur des Gases ausreicht, bei der Durchströmung des außerhalb des Reaktors gelegenen Wärmeaustauschers Dampf zu erzeugen. Dieser Dampf dient zum Antrieb gewöhnlicher Turbinen, die ihrerseits Generatoren antreiben.

Der wesentliche Grund, warum die Engländer Reaktoren bauen, deren Wirkungsgrad in den USA als viel zu niedrig angesehen wird, ist der dringende Bedarf Englands an Atomenergie. Wir werden bald einige einfache wirtschaftliche Belange der Atomenergie behandeln, aber es ist offensichtlich, daß ein Land, dessen Kohlevorräte rasch dahinschwinden, sich die Atomenergie „leisten" kann, das heißt „muß", auch wenn die Erzeugung wegen der Verwendung von natürlichen Uran-Graphit-Reaktoren mit einem schlechten Wirkungsgrad behaftet ist. Die von einem Calder-Hall-Reaktor erzeugte Wärmeleistung beträgt 180 000 Kilowatt. Trotz der erheblichen Größe des Reaktors erscheinen von dieser Leistung nur 40 000 Kilowatt als elektrische, über Leitungen abgegebene Leistung. Das Verhältnis von 40 000 zu 180 000 ergibt 22 Prozent, dies ist der *Gesamtwirkungsgrad* des Kraftwerkes. Wie wir gesehen haben, steht der Wirkungsgrad in engem Zusammenhang mit der Temperatur des Kühlmittels, er ist durch diese zwangsläufig festgelegt.

Reaktoren mit abgetrennten Isotopen

Wenn abgetrennte Uran- und Wasserstoffisotope vorhanden sind, nimmt die Zahl der möglichen Reaktortypen stark zu. *Schweres Wasser* enthält an Stelle von gewöhnlichem Wasserstoff (H^1) schweren Wasserstoff (H^2) und unterscheidet sich in seinem atomaren Verhalten von gewöhnlichem leichten Wasser wenig, seine Neutronenabsorption dagegen ist nur etwa ein Tausendstel der des leichten Wassers. Verwendet man also in einem Reaktor statt Graphit schweres Wasser als Bremsmittel, so ist die Neutronenabsorption viel kleiner, die Überschußempfindlichkeit ($k - 1$) ist größer, und es eröffnet sich die Möglichkeit, die verschiedensten Kühlmittel und Baumaterialien zu verwenden. Mit anderen Worten, das schwere Wasser absorbiert so wenig Neutronen, daß es nichts ausmacht, einige Neutronen in anderen Materialien zu verlieren.

Verwendet man an Stelle von natürlichem Uran angereichertes Uran, so können noch größere Mengen Kühlmittel und Baumaterialien verwendet und der Reaktor kleiner gehalten werden. Durch die Entfernung von U^{238}-Atomen werden ja viele Neutronen vor der Absorption in U^{238} gerettet, diese können dann U^{235}-Atome spalten und so zur Kettenreaktion beitragen. Es kann sogar auf Anordnung des Urans in einzelnen Stücken verzichtet und der sogenannte *homogene Reaktor* verwendet werden. Bei diesem wird das Uran in einer im Reaktor zirkulierenden Flüssigkeit gelöst, die auch die Wärmeenergie wegschafft. Das Bremsmittel selbst kann weggelassen werden. Obwohl die Neutronen dann kaum noch abgebremst werden, läßt sich unter Verwendung stark angereicherten Brennstoffes die Kettenreaktion aufrechterhalten. In einem solchen Reaktor mit schnellen Neutronen (schneller Reaktor) beträgt die durchschnittliche Neutronenenergie Hunderttausende von Elektronenvolt, an Stelle der 0,02 Elektronenvolt bei einem Reaktor mit langsamen oder thermischen Neutronen (thermischer Reaktor). Wir wollen im Moment nicht weiter auf die verschiedenen, durch Benützung abgetrennter Isotope möglichen Reaktorkonstruktionen eingehen, später werden wir in diesem Kapitel die aussichtsreicheren, heute in den USA konstruierten Reaktortypen beschreiben.

Bei der großen Vielfalt von Reaktortypen, die mit angereichertem Brennstoff möglich sind, können wir auch kompliziertere Programme betrachten als nur die Herstellung von elektrischer Energie. Eines dieser Ziele ist das *Brüten.* Darunter versteht man die Herstellung von mehr spaltbarem Material durch Neutronenabsorption in einem Reaktor, als dieser selbst als Brennstoff verbraucht. Zum Beispiel könnte ein Reaktor zum Brüten verwendet werden, der als Brennstoff Pu^{239} und außerdem etwas U^{238}, das nicht spaltbare Uran-Isotop, enthält. Absorbiert ein U^{238}-Kern ein Neutron, so entsteht U^{239}; dessen radioaktiver Zerfall liefert schließlich nach der Emission von insgesamt 2 Betateilchen Pu^{239}. Übersteigt die Zahl der so erzeugten Pu^{239}-Atome die Zahl der im Verlaufe der Kettenreaktion durch Spaltung zerstörten, so spricht man von Brüten. Den Ausdruck Brüten gebraucht man strenggenommen nur dann, wenn die erzeugten Atome von der gleichen Art wie die des Brennstoffes sind, während man von *Umwandlung* spricht, wenn die erzeugten spaltbaren Atome anderer Art als die des Brennstoffes sind. Außerdem ist mit dem Brüten *gewöhnlich* ein Reingewinn an spaltbarem Material verbunden (*Brütgewinn* größer als 1), während der Ausdruck Umwandlung auch beim Vorhandensein eines Verlustes (*Umwandlungsverhältnis* kleiner als 1) gebraucht wird. Bei dem gewöhnlichen, natürlichen Uran-Graphit-Reaktor handelt es sich um einen Umwandlungsreaktor, denn er verbraucht U^{235} und erzeugt Pu^{239}.

Die früher angegebenen Zahlen machen deutlich, daß in einem solchen Reaktortyp weniger Plutonium erzeugt als Uran durch Spaltung verbraucht wird, das Umwandlungsverhältnis also kleiner als 1 ist. Ist jedoch angereicherter Brennstoff verfügbar, so ist es im Prinzip möglich, einen Reaktor zu bauen, für den der Brutgewinn oder das Umwandlungsverhältnis beträchtlich größer als 1 werden. Zum Beispiel ist die Konstante η für U^{235} und langsame Neutronen 2,08. Von den in U^{235} erzeugten 2,08 Neutronen (durch die schnelle Spaltung sind es noch etwas mehr) wird eines zur Fortpflanzung der Kettenreaktion und eines zur Erzeugung eines Atoms

spaltbaren Materials an Stelle des durch Spaltung zerstörten Atoms gebraucht. Von den bleibenden ungefähr 0,08 Neutronen geht ein Teil durch Absorption in Verunreinigungen und Baumaterialien verloren; was dann noch übrigbleibt, gibt den Reingewinn an Atomen spaltbaren Materials je Generation an, weil jedes dieser übrigbleibenden Neutronen, wenn es in U^{238} absorbiert wird, Pu^{239} erzeugt. Ähnliche Betrachtungen zeigen, daß ein Reaktor mit U^{233} als Brennstoff und damit einem η von 2,31 für das Brüten sehr geeignet ist. In diesem Fall würde wieder ein kleiner Teil der zusätzlichen 0,31 Neutronen durch unvermeidliche Absorption in Verunreinigungen und Baumaterialien verlorengehen, der Rest aber für die Absorption in dem den Reaktor umgebenden Mantel aus Thoriummetall zur Verfügung stehen. Das Th^{232} wird durch Einfang eines Neutrons zu Th^{233}, und dieses verwandelt sich durch Emission von 2 Betateilchen in U^{233}. Das Prinzip des Th^{232}-U^{233}-Brütens wird in Figur 18 schematisch dargestellt.

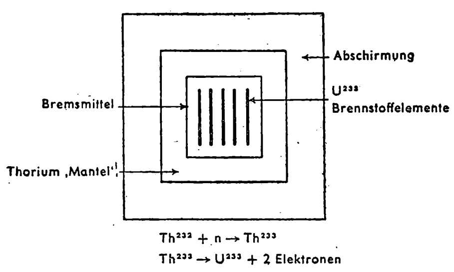


Fig. 18. Das Schema eines Brutreaktors, in dessen Mantel mehr spaltbares Material erzeugt wird, als im Gitter des Reaktors verbraucht wird.

Die bei der Spaltung des U^{233}-Brennstoffes emittierten Neutronen verlassen den inneren Teil des Reaktors, das *Gitter*, werden in dem umgebenden Thoriummantel absorbiert und verursachen so die Bildung von neuem U^{233}. Der Gebrauch von Pu^{239} in einem langsamen Reaktor ist für das Brüten oder die Umwandlung ungünstig, weil der Wert von η mit 2,03 nur knapp über 2 liegt; aussichtsreich ist es dagegen als Brennstoff

für das Brüten in einem schnellen Reaktor, weil η mit der Neutronenenergie stark zunimmt.

Heute wird das Brüten vielleicht weniger betont als vor etwa zehn Jahren, als die Physiker zum erstenmal ernsthaft die Zukunft der Atomenergie betrachteten. Damals wurde die meiste Arbeit von theoretischen Physikern geleistet, die sich durch das Brüten und dessen weitreichende Möglichkeiten angezogen fühlten und es auf mathematische Weise behandelten, dabei aber viele praktische Einzelheiten vernachlässigten. Schließt man diese Gesichtspunkte mit ein, z. B. den Kapitalbedarf, die bei der Planung notwendigen Kompromisse zwischen optimalem Brüten und größter Energieausbeute, den Verlust an Spaltmaterial bei der chemischen Aufbereitung, so ist die Anziehungskraft einer Brutanlage um vieles geringer.

Das Leistungsreaktoren-Programm der Vereinigten Staaten

Die Verwendung der Kernbrennstoffe U^{233}, U^{235} und Pu^{239} zur Energieerzeugung setzt voraus, daß Reaktoren entwickelt werden, mit denen elektrische Energie zu einem Preis gewonnen werden kann, der mit dem der vorhandenen, gewöhnlichen Kraftwerke ungefähr übereinstimmt. Daß es sich dabei um keine einfache Aufgabe handelt, kann schon aus der Größe der in den USA aufgewendeten Mittel geschlossen werden. Die Atomenergiekommission will im Verlaufe von fünf Jahren allein für diesen Zweck 300 Millionen Dollar aufwenden. Außer diesem Beitrag der AEC wird auch die Privatindustrie für die Entwicklung der Atomenergie große Summen ausgeben. In dem für den Kongreß bestimmten AEC-Bericht vom Jahre 1956 wird geschätzt, daß die Privatindustrie für die Entwicklung von Atomkraftwerken in den nächsten fünf Jahren 358 Millionen Dollar investieren wird.

Diese großen Summen schließen nur solche Entwürfe ein, die schon reif für die praktische Ausführung sind. Viele Reaktortypen haben das Stadium der praktischen Ausführung noch nicht erreicht, aber wir wollen hier die wirklich unmittelbar bevorstehende Entwicklung der Atomenergie betonen und da-

her nur Reaktoren behandeln, die im Bau sind oder in nächster Zukunft gebaut werden sollen. Es handelt sich also nicht um unsichere Möglichkeiten, sondern um Reaktoren, die in einigen Jahren tatsächlich elektrische Energie in das Stromnetz unseres Landes liefern, die in Haushalten und Betrieben verbraucht wird. Es ist richtig, daß diese atomar erzeugte Energie allgemein mehr kosten wird als die mit den üblichen Methoden in den USA erzeugte, aber sie wird weniger kosten als die Energie in den Gebieten der Welt, in denen die üblichen Brennstoffe sehr knapp sind. Um die Leistungsreaktoren der nahen Zukunft auf breiter Basis zu behandeln, wollen wir nicht nur die Kostenlage in den USA, sondern auch die im Ausland untersuchen.

Die technischen Details dieser Reaktoren können in den nicht geheimen Berichten der AEC gefunden werden; gute allgemeine Leitfäden sind die halbjährlichen Berichte der AEC für den Kongreß, die beim Government Printing Office, Washington, D. C., erhältlich sind. Für den gewöhnlichen Bürger, der keine Zeit oder keine Übung hat, um sich eingehend mit technischen Fragen zu beschäftigen, ist es vielleicht nützlich, wenn wir kurz die im Bau oder in der Planung befindlichen Reaktoren betrachten. Solch ein Überblick wird uns die Größe der gegenwärtig in den USA unternommenen Anstrengung und den wahrscheinlichen Eintritt der Atomenergie in unsere Energiewirtschaft vor Augen führen. Ausgedehnte Energieprogramme gibt es auch in Großbritannien und der UdSSR, wir werden aber unsere Betrachtung auf die zur Zeit in den USA vorhandenen Reaktortypen beschränken. Da sich das Programm der USA auf fortschrittliche Reaktortypen konzentriert, von denen fast alle wichtigen Details bekannt sind, ist es geeignet, alle Möglichkeiten der Atomenergie deutlich zu machen. In Kapitel VII werden wir die allgemeineren, internationalen Gesichtspunkte der Atomenergie behandeln, besonders ihre mögliche Rolle als Beispiel für internationales Verständnis und gegenseitige Hilfe.

Es gibt heute in den USA mehrere in Bau oder fortgeschrittener Planung befindliche Typen von Leistungsreaktoren, deren Leistung groß genug ist, um mit durchschnittlichen Kohlekraftwerken verglichen werden zu können. Man betrachtet sie

also als Musteranlagen, als Experimente großen Stils, die notwendig sind, um die Ausführung mit dem besten Wirkungsgrad der Energieerzeugung zu finden. Eine kurze Übersicht zeigt den weiten Rahmen der untersuchten Konstruktionen.

1. *Der Druckwasserreaktor.* Bei diesem Reaktortyp wird als Kühlmittel Wasser mit einem Druck bis zu 140 kg je Quadratzentimeter benützt, denn nur Wasser unter hohem Druck kann auf hohe Temperatur erhitzt werden, ohne zu kochen. In diesem Fall erreicht das Wasser eine Temperatur von 260° Celsius, also bedeutend mehr als die Siedetemperatur von 100° Celsius bei gewöhnlichem Druck. Nach seinem Austritt aus dem Reaktor zirkuliert das heiße Hochdruckwasser in Wärmeaustauschern und erzeugt in darin enthaltenen Leitungen Dampf von niedrigerem Druck, etwa 42 Kilogramm je Quadratzentimeter. Der Dampf wird dann genau wie in einem Kohlekraftwerk zum Antrieb von Turbogeneratoren verwendet. Die Leistungskapazität beträgt 60 000 Kilowatt oder mehr, je nach der benützten speziellen Konstruktion. Tatsächlich wurde bis heute der Bau dreier verschiedener Konstruktionen von Druckwasserreaktoren vorgeschlagen.

Eine dieser Konstruktionen ist bestimmt für einen Reaktor in Shippingport, Pennsylvania, der fast fertig ist. (Anmerk. des Übersetzers: Ende Mai 1958 in Betrieb genommen.) Er wird gebaut und betrieben von der Duquesne Light Company of Pittsburgh, die bis zu 5 Millionen Dollar Kosten übernimmt, den Rest zahlt die Atomenergiekommission. Die AEC wird der Energiegesellschaft den von dem Reaktor erzeugten Dampf verkaufen. Der Preis berechnet sich aus den Brennstoffkosten und anderen wirtschaftlichen Faktoren der Energieerzeugung, wahrscheinlich beträgt er 4,2 Pfennige für die Kilowattstunde, also nur wenig mehr als der übliche Preis. Eine Gesamtansicht des Kraftwerkes zeigt Fig. 19 (Tafel). Die Duquesne Light Company wird die übliche Einrichtung des Kraftwerkes erstellen, während der Reaktor selbst von der Westinghouse Electric Corporation geplant wurde. Im Reaktor werden etwa 45 kg hoch angereichertes Uran als Brennstoff benützt, umgeben wird der Reaktor von einem 12 Tonnen schweren Mantel aus natürlichem Uran, also überwiegend

U^{238}. Die Aufgabe des Mantels ist die Absorption von Neutronen durch U^{238}, also die Herstellung von Pu^{239}; es handelt sich dabei um die von uns besprochene *Umwandlung*. Nachdem der Reaktor einige Zeit in Betrieb gewesen ist, kann das Plutonium von dem Uran chemisch abgetrennt werden. Die im Mantel erzeugte Plutoniummenge ist kleiner als die im Reaktor verbrauchte Uranmenge; für jeweils 5 durch Spaltung zerstörte U^{235}-Kerne werden nur etwa 4 Pu^{239}-Kerne erzeugt; man sagt, das *Umwandlungsverhältnis* ist 4/5 oder 0,8.

Die Yankee Atomic Electric Company, in der zwölf Konzerne zusammenarbeiten und die im Rahmen des *AEC-Kernenergie-Programms* durch AEC-Mittel unterstützt wird, schlug eine andere Art von Druckwasserreaktor für Western Massachusetts vor. Die AEC verlangt in diesem Fall sieben Jahre lang keine Bezahlung für das zur Verfügung gestellte spaltbare Material. Der Reaktor wird ungefähr 27 Tonnen Uran enthalten, das aber im Vergleich zu dem fast reinen U^{235} des Duquesne Reaktors nur leicht angereichert ist, nämlich auf 2,7 Prozent U^{235}. Der Reaktor wird 134 000 Kilowatt Leistung liefern, im Vergleich zu den 60 000 Kilowatt der Duquesne-Anlage; er wird von Westinghouse gebaut, und die Inbetriebnahme der ganzen Anlage ist für 1960 geplant.

Eine dritte Konstruktion dieser Art stammt von den Consolidated Edison Company und wird in Indian Point nahe New York durch die Babcock and Wilcox Company gebaut. Die Ausgaben für den Reaktor werden allein durch die Consolidated Edison Company getragen. In diesem Reaktor wird ebenfalls hoch angereichertes Uran als Brennstoff verwendet. Ein Mantel aus 9 Tonnen Thorium liefert durch Einfang von Neutronen U^{233}. Anfänglich handelt es sich um einen Umwandlungsreaktor, ist aber in dem Mantel so viel U^{233} erzeugt worden, daß es als Brennstoff dienen kann, so kann der Reaktor, wenn ein *Brutgewinn* größer als 1 erreicht wird, als Brutreaktor arbeiten. Zu den vom Reaktor gelieferten 160 000 Kilowatt werden durch Verbrennung von Öl weitere 110 000 Kilowatt erzeugt, diese dienen zur Überhitzung des Dampfes und damit zur Verbesserung des Wirkungsgrades der Umformung von Wärme in elektrische Energie.

Ein wichtiger Punkt beim Entwurf jedes Reaktors ist die

Vermeidung von Korrosion, hauptsächlich dort, wo Uranbrennstoff und Kühlmittel zusammentreffen. Das Problem wird besonders schwierig, wenn es sich um Wasser hoher Temperatur handelt, es erfordert die Verwendung korrosionsbeständiger Materialien. Diese Materialien müssen nicht nur chemisch widerstandsfähig sein, sondern auch Kerne haben, die wenig Neutronen absorbieren, sonst beeinträchtigen sie die Kettenreaktion und das Brüten oder die Umwandlung. Ein Metall, das diese Forderungen weitgehend erfüllt, ist Zirkonium; aus diesem Grund wurde es trotz seines hohen Preises zu einem wichtigen Bestandteil der Leistungsreaktoren. Die Herstellung von Brennstoffelementen, deren Schutzhülle hohen Temperaturen standhält, chemisch widerstandsfähig ist und wenig Neutronen absorbiert, war für die Chemiker und Metallurgen ein sehr schwieriges Problem. Die Anforderungen führten zu Konstruktionen, bei denen als Kühlmittel nicht Wasser, sondern flüssiges Metall, wie Natrium, oder eine Legierung aus Natrium und Kalium verwandt wird. Diese Kühlmittel bremsen die Neutronen fast nicht ab und ermöglichen also den *schnellen Reaktor.*

2. *Der schnelle Brutreaktor.* Die Fertigstellung eines solchen Reaktors im Jahre 1959 wird von der Detroit Edison Company zusammen mit anderen Firmen und der finanziellen Hilfe der AEC geplant. Er soll eine elektrische Leistung von etwa 100 000 Kilowatt liefern können. Auffallend an diesem Reaktor ist der kleine Reaktor*kern,* in dem die Kettenreaktion stattfindet. Dieser nimmt zusammen mit dem umgebenden Mantel aus natürlichem Uran nur einen Raum von 91 Zentimetern Länge und 91 Zentimetern Durchmesser ein. Der Brennstoff ist bis auf 20 Prozent U^{235} angereichert und wiegt etwa 2250 Kilogramm. Als Kühlmittel wird flüssiges Natrium mit einer Temperatur von 430° Celsius und einem Druck von 7 bis 14 Kilogramm je Quadratzentimeter benützt. Die Dampftemperatur wird 390° Celsius sein und damit einen besseren Wirkungsgrad der Umwandlung von Wärme in elektrische Energie ermöglichen als bei den Druckwasserreaktoren, die eine niedrigere Dampftemperatur liefern. Weil dieser Reaktor, wie der Name sagt, mit schnellen, nicht abgebremsten Neu-

tronen arbeitet und η mit der Neutronenenergie zunimmt, sind seine Brütmöglichkeiten größer. Der Reaktor wird dem schnellen Versuchsreaktor ähneln, der in Arco, Idaho, bereits zwei Jahre lang in Betrieb ist. Weil mit diesem Arco-Reaktor ein kleiner Unglücksfall passierte, bei dem einige Brennstoff-

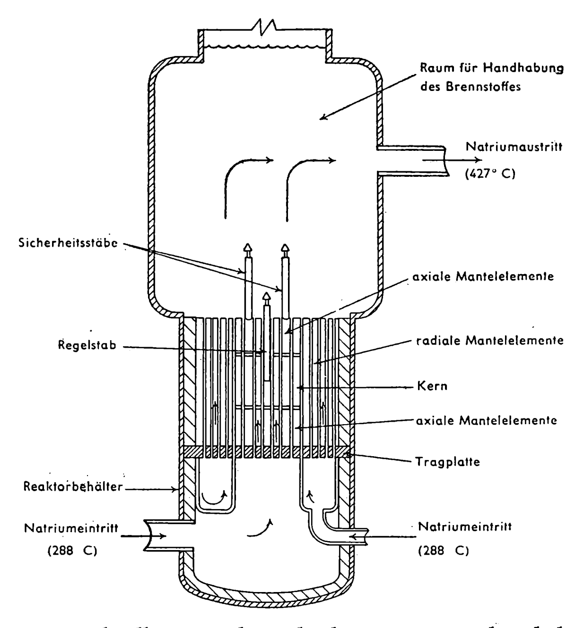


Fig. 20. Der schnelle Brutreaktor, der kein Bremsmittel enthält und in dem als Kühlmittel flüssiges Natrium benutzt wird (Detroit Edison Co.).

stäbe schmolzen, entstand über die Sicherheit des Detroit-Reaktors etwas Unruhe. Die AEC besteht aber ohnehin auf äußerst strengen Sicherheitsprüfungen, bevor irgendein Hochleistungsreaktor nahe bewohnten Gebieten in Betrieb genommen wird. Diesbezügliche Befürchtungen sind überflüssig, denn die Inbetriebnahme eines Reaktors kann nur erfolgen, wenn das „Reaktor-Sicherheitskomitee" völlig überzeugt ist, daß kein Unglücksfall vorkommen kann.

3. *Der Natrium-Graphit-Reaktor.* Mit einem solchen Reaktor, der in Nebraska liegen und von dem Consumers Public Power District betrieben werden wird, sollen noch höhere Temperaturen als die bisher angegebenen erreicht werden. Der Reaktor wird 75 000 Kilowatt elektrischer Leistung liefern. Man verwendet 22 500 Kilogramm Uran, das 1,8 Prozent U^{235} enthält, also, wie der Vergleich mit natürlichem Uran, das 0,7 Prozent U^{235} enthält, zeigt, nur schwach angereichert ist. Der Reaktor wird eine Temperatur von 500° Celsius erreichen und Dampf mit einer Temperatur von 445° Celsius erzeugen. Das Natrium-Kühlmittel fließt durch Kanäle, die in den Brennstoffstäben und den umgebenden Graphitstäben angebracht sind. Alle Stäbe sind mit Zirkonium überzogen. Der Graphit dient als *Bremsmittel* für die Neutronen, er bremst sie auf die Temperatur des Graphits ab; es ist also ein langsamer oder *thermischer Reaktor.* Der zylindrische Reaktorkern hat einen Durchmesser von über 5,2 Metern und eine Höhe von 4,25 Metern. Es wurde ein zweiter Reaktorkern entworfen, bei dem als Brennstoff eine Kombination von Thorium und U^{235} verwendet wird. Von dieser Kombination verspricht man sich ein Umwandlungsverhältnis, das nahe bei 1 liegt, so daß also für jedes „verbrannte" Brennstoffatom ein neues Brennstoffatom erzeugt wird. Schätzungen der Kosten für Betrieb und Unterhalt ergaben für den Uran-Reaktor 4,6 Pfennige je Kilowattstunde, für den Uran-Thorium-Reaktor 3,8 Pfennige je Kilowattstunde und für den letzteren die Möglichkeit, in der Zukunft auf 2,5 bis 2,9 Pfennige je Kilowattstunde zu kommen. Fig. 21 (Tafel) zeigt die Zeichnung einer kompletten Anlage des Natrium-Graphit-Typs, geplant von der North American Aviation, Inc., die zur Zeit nahe Los Angeles einen kleinen Versuchsreaktor baut, um die Betriebseigenschaften eines Natrium-Graphit-Reaktors zu untersuchen.

4. *Der Siedewasser-Reaktor.* Dieser in Fig. 22 gezeigte Reaktor unterscheidet sich in der Dampferzeugung stark von den vorhergehenden. Die Dampferzeugung findet nicht in einem Wärmeaustauscher statt, sondern unmittelbar im Reaktorkern, dieser befindet sich in einem Kessel, der sowohl das Bremsmittel Wasser als auch den Brennstoff enthält. In einem Re-

aktor dieses Typs, den die Commonwealth Edison und andere in der Nähe von Chikago errichten wollen, wird der Brennstoff etwa 1,1 Prozent U^{235} enthalten und ein Gewicht von fast 68 000 Kilogramm haben. Der Reaktor, dessen Fertigstellung für 1960 geplant ist, wird vollständig von Commonwealth

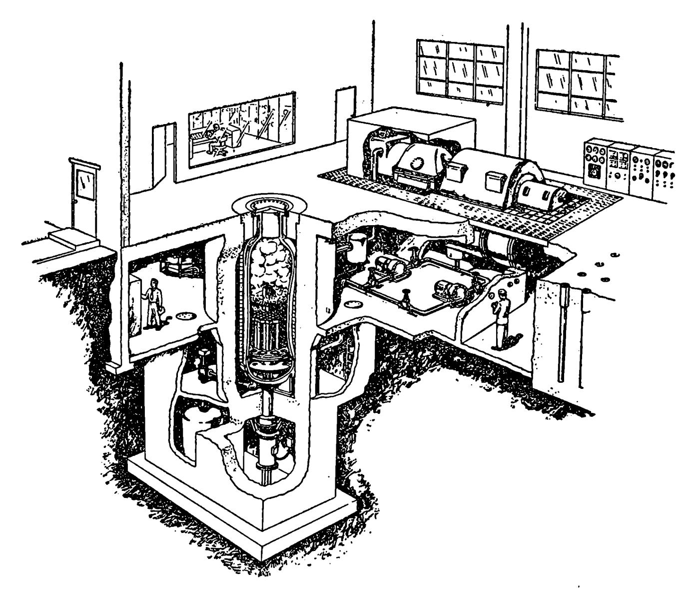


Fig. 22. Der Siedewasser-Reaktor, bei dem der Dampf im Reaktor selbst erzeugt wird, so daß kein Wärmeaustauscher notwendig ist, wie es bei den Reaktoren der Figuren 19, 20 und 21 der Fall ist (United States Atomic Energy Commission).

Edison finanziert. Er wird bei einer Temperatur von 250° Celsius arbeiten und eine Leistung von 180 000 Kilowatt erzeugen. Eine Versuchsausführung dieses Reaktortyps arbeitet in Arco, Idaho, seit etwa einem Jahr erfolgreich. Ein großer Vorteil dieses Reaktors ist seine einfache Konstruktion, bei der die Wärmeaustauscher und viele sonstige kostspielige Einrichtungen anderer Reaktortypen wegfallen. Die Bau- und Betriebskosten des Versuchsreaktors erwiesen sich etwa doppelt

so hoch wie die einer kohlebefeuerten Anlage vergleichbarer Leistung. Dieses Verhältnis ermöglicht in vielen kohlearmen Teilen der Welt den Wettbewerb mit der Kohle.

5. Der homogene Reaktor. In allen vorhergehenden Reaktortypen werden Brennstoffelemente aus festem Uran benützt, die von einer Schutzschicht umgeben sein müssen, die hohe Temperaturen aushält und die erforderlichen chemischen und kernphysikalischen Eigenschaften besitzt. Eine Methode, um die mit festen Brennstoffelementen verbundenen metallurgischen Schwierigkeiten zu vermeiden, ist die Verwendung eines Brennstoffes, der aus einer in Wasser löslichen Uranverbindung besteht. Der Brennstoff kann dann in schwerem Wasser aufgelöst werden, das als Bremsmittel für die Neutronen dient und bedeutend weniger Neutronen absorbiert als gewöhnliches Wasser. Einen solchen Reaktor bezeichnet man als *homogenen Schwerwasserreaktor.* Dieser Reaktortyp hat zahlreiche Vorteile: Seine Leistung ist sehr konstant (es sind keine Regelstäbe erforderlich, denn mit zunehmender Temperatur des Reaktors sinkt seine Leistung); die Brennstofflösung kann auf ihrem Weg außerhalb des Reaktors ständig von unerwünschten Spaltbruchstücken befreit werden; die Konstruktion ist einfacher, weil im Reaktorkern keine Regelstäbe und Baumaterialien vorhanden sind. Nachteilig sind vor allem die im Reaktorbehälter und dem damit verbundenen Rohrsystem auftretende Korrosion, der durch die notwendige hohe Wassertemperatur bedingte große Druck von etwa 140 Kilogramm je Quadratzentimeter und die Notwendigkeit, ein großes Volumen stark radioaktiver Flüssigkeit so abzuschließen, daß eine Undichtigkeit praktisch unmöglich ist. Außerdem muß eine ungefährliche Wiedervereinigung des bei der Zersetzung des Bremsmittels entstehenden Deuteriums und Sauerstoffs erfolgen.

Ein Kraftwerk mit einem solchen Reaktor soll im östlichen Pennsylvania errichtet werden. Es wird Eigentum der Pennsylvania Power and Light Company sein, durch diese betrieben und ganz aus privaten Mitteln finanziert werden. Seine Leistung soll 150 000 Kilowatt betragen und die Inbetriebnahme 1962 erfolgen.

Im Brookhaven National Laboratory wird zur Zeit eine andere Art des homogenen Reaktors untersucht, in diesem wird eine Lösung von Uran in flüssigem Wismut verwendet. Den Aufbau dieses Reaktors zeigt Fig. 23. Diese Konstruktion be-

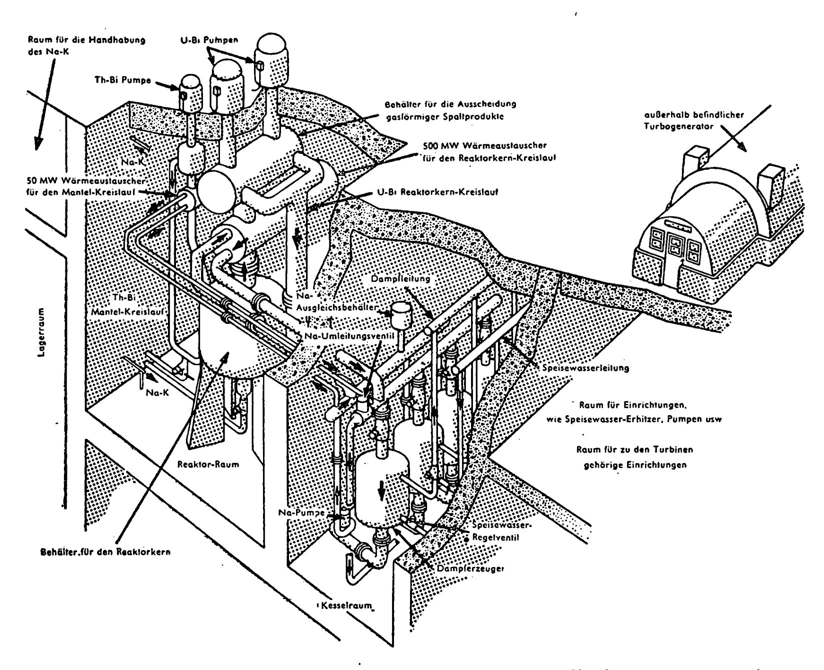


Fig. 23. In diesem Reaktor benutzt man an Stelle fester Brennstoffelemente eine Lösung von Uran in einem Kühlmittel aus flüssigem Wismut. Eine flüssige Mischung aus Natrium und Kalium transportiert die Wärmeenergie zum Dampferzeuger.

sitzt alle Vorteile des Wassertyps, vermeidet aber einige Nachteile, vor allem die Zersetzung des Wassers und die mit Wasser von hoher Temperatur und großem Druck verbundenen Korrosionsprobleme. Die AEC hat die Firma Babcock and Wilcox mit der technischen Planung eines Versuchsreaktors dieses Typs beauftragt, während Brookhaven die mit diesem Reaktor zusammenhängende Forschungsarbeit weiterführt.

Das durch die Schilderung der Kernreaktoren entstandene Bild des Kernenergieprogramms ist wegen der ständigen Vergrößerung und Verbesserung nur vorläufig richtig. Viele Arten von Versuchs- und Forschungsreaktoren wurden nicht beschrieben, weil die Vielfalt ihrer Konstruktion und Leistung im Rahmen einer so kurzen Übersicht nicht behandelt werden kann und sie nicht unmittelbar zum Gebiet der Leistungsreaktoren gehören. Es ist aber möglich und sogar wahrscheinlich, daß einige dieser Reaktortypen sich als äußerst aussichtsreich erweisen und in ein paar Jahren große Leistungsreaktoren dieser Typen gebaut werden.

Obgleich in den Vereinigten Staaten noch große Mengen gewöhnlichen Brennstoffs verfügbar sind, macht diese kurze Übersicht deutlich, daß dort für die Errichtung von Kernenergieanlagen sehr viel unternommen wird. Ohne Verwendung von Atomenergie hat sich die Leistungskapazität der USA seit 1945 verdoppelt, sie beträgt jetzt 100 Millionen Kilowatt. Die gegenwärtigen Schätzungen liefern eine Versechsfachung dieser Kapazität bis 1980; zu dieser Zeit wird aber ein Sechstel der Kapazität, also die derzeitige, durch Kernenergie erzeugt werden. Schätzungen dieser Art enthalten viele unsichere Faktoren, aber auch wenn diese Daten falsch sind, kann auf Grund der bisherigen Fortschritte wenig Zweifel bestehen, daß Kernbrennstoffe in der Energiewirtschaft letzten Endes eine große Bedeutung erlangen werden.

Die Wirtschaftlichkeit der Atomenergie

Bisher behandelten wir die Grundlagen der Kettenreaktion, die verschiedenen Reaktortypen und die praktischen Probleme, die auftauchen, wenn die bei der Spaltung auftretende Wärmeenergie mit vernünftigem Wirkungsgrad in elektrische Energie umgewandelt werden soll. Wir haben uns dabei in keiner Weise mit Kosten beschäftigt, sondern angenommen, daß die abgetrennten Isotope und Stoffe, wie Beryllium, Natrium, Kalium und Wismut, frei zur Verfügung stehen. Es ist sicher an der Zeit, daß wir uns der Wirklichkeit zuwenden und uns die Frage stellen, was das alles kostet. Die Erzeugung von Atom-

energie ist zwar prinzipiell möglich, aber eine wesentliche wirtschaftliche Bedeutung kann sie nur erlangen, wenn sie mit der aus den gewöhnlichen Brennstoffen erzeugten Energie in Wettbewerb treten kann.

Man kann natürlich die Auffassung vertreten, daß die Atomenergie ohne Rücksicht auf Kosten weiterentwickelt werden *soll* — daß sie letzten Endes, ganz gleich wie teuer sie ist, verwendet werden wird. Der Grund für diese Ansicht ist, daß eines Tages alle anderen Brennstoffe aufgebraucht sein werden und wir dann *gezwungen* sind, uns der Atomenergie zuzuwenden. Dieses Argument hat etwas für sich, gerade heute in den USA, wo die bisherige Entwicklung der atomaren Energieerzeugung nicht gestattet, elektrische Energie billiger herzustellen, als dies mit den Brennstoffen Kohle, Öl oder Gas möglich ist. Wollten wir mit dem Bau unserer großen Leistungsreaktoren warten, bis sie elektrische Energie liefern können, die billiger als die mit anderen Brennstoffen erzeugte ist, so könnte es sehr gut sein, daß so große Anlagen *nie* gebaut werden. Es könnte sehr gut sein, daß dieses kurzsichtige Prinzip eine hoffnungslose Verzögerung der Entwicklung auf diesem Gebiet zur Folge hätte.

Aber natürlich ist die Ansicht, daß die Kosten wegen der sich einmal einstellenden Knappheit anderer Brennstoffe unwichtig sind, nicht gleichbedeutend mit einer völligen Außerachtlassung aller wirtschaftlichen Gesichtspunkte. Wenn die Brennstoffe immer seltener werden, so wird ihr Preis schließlich so hoch werden, daß die Atomenergie billiger ist, unabhängig davon, wie teuer sie, absolut betrachtet, ist. Wir sehen also, daß die Kosten, und zwar die relativen, die künftige Entwicklung der Atomenergie stark beeinflussen. Trotz der wohl zwangsläufigen Entwicklung der Atomenergie hängt die Geschwindigkeit ihrer praktischen Verwirklichung innerhalb der nächsten Jahrzehnte weitgehend von ihrer Wirtschaftlichkeit ab.

Man kann fast unmittelbar einsehen, daß der Preis der mit Kernbrennstoffen erzeugten elektrischen Energie in einem Land wie den USA, wo die „fossilen Brennstoffe" — Kohle, Öl und Gas — so leicht verfügbar sind, nicht viel unter den derzeitigen Preisen liegen kann. Dies erklärt sich daraus, daß die in beiden Fällen benötigten Einrichtungen zum großen

Teil die gleichen sind. Die zur Erzeugung des überhitzten Hochdruckdampfes benützte Wärmequelle ist zwar ganz verschieden — ein Kernreaktor an Stelle einer Kesselanlage mit z. B. Kohlenbefeuerung —, aber alle nachfolgenden Einrichtungen des Kraftwerkes sind die gleichen. So sind sowohl die Dampfturbinen zum Antrieb der Generatoren als auch die Generatoren selbst gleich. Ebenfalls identisch sind die Hochspannungsleitungen für den Transport der elektrischen Energie durch das Land und die Transformatoren, welche die Spannung auf eine zum Gebrauch in Betrieben und Haushalten geeignete Größe verringern. Zusammen machen diese bei der Erzeugung elektrischer Energie aus Kernbrennstoffen und üblichen Brennstoffen übereinstimmenden Anlagen einen großen Teil des Preises aus, der auf der Rechnung des Verbrauchers erscheint. Dieser große Teil des Preises läßt sich also durch die Verwendung von Atomenergie nicht verringern, das ist nur für den kleineren Teil des Preises möglich, der durch die Kosten des Brennstoffes und der Dampferzeugungsanlage bedingt ist; dieser Bruchteil des Preises ist in den USA sehr klein, etwa 5 bis 20 Prozent, je nach Ort und Lage des Kraftwerkes. Durch die Verwendung von Kernbrennstoffen an Stelle der fossilen Brennstoffe könnte also *bestenfalls* eine Herabsetzung des Preises elektrischer Energie um 5 bis 20 Prozent erreicht werden. Der große Vorteil der aus der Kernspaltung gewonnenen Energie zeigt sich also gegenwärtig nicht in Ländern wie den USA, wo fossile Brennstoffe reichlich und leicht verwertbar vorkommen, sondern in Ländern, in denen der Brennstoff vor seiner Verwendung zur Energieerzeugung weite Strecken transportiert werden muß. In einem solchen Land müssen nämlich an Stelle von Tausenden von Tonnen Kohle nur Kilos von Uran zum Kraftwerk befördert werden.

Auf Grund dieser äußerst kleinen Brennstoffmengen kann der Bauplatz eines Kraftwerkes praktisch völlig frei gewählt werden. Somit fallen auch extrem lange Leitungen zum Transport der erzeugten elektrischen Energie weg. In Gegenden, in denen Brennstoffe schwer verfügbar sind, können also nicht nur beim Brennstoff, sondern auch bei den elektrischen Leitungen Kosten eingespart werden, so daß die Verwendung von Atomenergie große Vorteile bringt.

Wichtig ist, daß gerade die Länder, denen die Verwendung von Atomenergie die größten Vorteile bringen würde, wegen mangelnder Industrialisierung zur Zeit nicht in der Lage sind, sich diese nutzbar zu machen. Aus diesem Grunde würde eine internationale Zusammenarbeit zur Entwicklung der Atomenergie ganz sicher von großem Nutzen sein. Die hochentwikkelten Länder könnten auf diese Weise helfen, die Atomenergie möglichst schnell den Ländern zugänglich zu machen, die aus ihrer Verwendung die größten Vorteile ziehen können. Später werden wir die neueren, sehr hoffnungsvollen Entwicklungen der internationalen Atomarbeit behandeln, es erscheint sicher, daß diese das materielle Wohlergehen der Menschheit unterstützen wird und sogar das politische Klima verbessern könnte.

Die Kostenermittlung beim Leistungsreaktor

Wir haben eben gesehen, daß die atomar gewonnene elektrische Energie in einem Land wie den USA, in dem fossile Brennstoffe reichlich vorhanden sind, nicht viel *billiger* sein kann als die mit den bisher üblichen Methoden erzeugte. Wir schlossen aber keineswegs die andere Möglichkeit aus — daß die Atomenergie teurer ist. Die Bau- und Betriebskosten eines Leistungsreaktors könnten ja bedeutend größer sein als z. B. die einer kohlenbefeuerten Kesselanlage. Um bei der Verwendung von Atomenergie zusätzliche Kosten zu vermeiden, muß der Leistungsreaktor kostenmäßig mit einer üblichen Kesselanlage konkurrieren können.

Obgleich der Preis des Uranbrennstoffes nicht so niedrig ist, daß er unwichtig ist, hat er doch keine primäre Bedeutung, er wird mit der Verbesserung der Herstellungsmethoden sogar abnehmen, während Kohle, Öl und Gas wegen der schwindenden Vorräte teurer werden. Die Hauptbedeutung haben also die Kosten des Reaktors und außerdem die Zeit, die der Reaktor arbeiten kann, ohne daß kostspielige Reparaturen nötig werden. Die Lebenszeit eines Reaktors ist für die Wirtschaftlichkeit der Atomenergie von größter Bedeutung, sie ist aber weitgehend unbekannt, weil die Lebensgeschichte einer so

komplizierten Anlage, wie sie ein Reaktor darstellt, schwer vorausgesagt werden kann. Letzten Endes kann diese Frage nur durch praktische Betriebserfahrung geklärt werden — Betriebserfahrungen sind aber wenig vorhanden.

Die Lebenszeit des Reaktors ist sehr wichtig, weil die Durchführung von Reparaturen schwierig ist. Der Reaktor ist ja, nachdem er einige Zeit in Betrieb war, äußerst radioaktiv. Die starke Strahlung der Spaltprodukte macht die Durchführung von Reparaturen am Reaktorkern unmöglich, auch wenn seit dem Abschalten des Reaktors Tage oder Wochen vergangen sind. Der Reaktor muß aus diesem Grunde so konstruiert werden, daß Fehler, die eine Reparatur erfordern, nur mit sehr geringer Wahrscheinlichkeit vorkommen können.

Bei den von uns beschriebenen Reaktortypen werden ziemlich ungewöhnliche Materialien und ganz besondere Herstellungsmethoden benützt. Es ist sehr ermutigend, daß trotz der besonderen Eigenschaften der Reaktoren die Baukosten für die gegenwärtig geplanten Typen niedrig genug sind, um mit denen einer mit fossilen Brennstoffen befeuerten Kesselanlage verglichen werden zu können. Die auf der Genfer Konferenz „Atome für den Frieden" im Jahre 1955 vorgebrachten Zahlen lassen den Schluß zu, daß ein Atomkraftwerk heute ungefähr doppelt soviel kostet wie ein Kohlenkraftwerk. Der Preis je Kilowatt Kapazität beträgt bei einem Atomkraftwerk etwa 300 Dollar; ein großes Kraftwerk der Art, wie sie beschrieben wurden, mit z. B. 200 000 Kilowatt, würde also 60 Millionen Dollar oder mehr kosten. Berücksichtigt man die sich auf diesem noch so jungen Gebiet sicher ergebenden Fortschritte, so ist es durchaus vorstellbar, daß der Preis für atomare und konventionelle Kraftwerke im Laufe der nächsten Jahrzehnte etwa der gleiche wird.

Der Preis atomarer Elektrizität

Es ist sehr schwierig, bei einem Atomkraftwerk den Endpreis für die Verbraucher mit soundso viel Pfennig je Kilowattstunde anzugeben, weil damit so komplizierte Vorgänge wie der Verkauf des im Reaktor erzeugten Plutoniums an die

Regierung verbunden sind. Der Preis hängt stark davon ab, wie schnell das Kraftwerk veraltet. Weniger Bedeutung hat der Preis des Uranbrennstoffes, der wegen der starken Kontrolle, welche die Regierung noch über spaltbare Stoffe ausübt, ebenfalls eine recht komplizierte Angelegenheit ist.

Trotz der Unsicherheit und des Mangels an Betriebserfahrung besteht zwischen den verschiedenen Atomwirtschaftlern Übereinstimmung in der Berechnungsart der verschiedenen Kosten und sogar in den sich ergebenden Resultaten. Die Übereinstimmung ist gut genug, um über die Kosten der elektrischen Energie, die in den geplanten Atomkraftwerken erzeugt werden wird, ziemlich feste Zahlen angeben zu können. Bei der Untersuchung der Kosten muß man jedoch sorgfältig die zugrunde gelegten Bedingungen beachten. So wird das erste große Atomkraftwerk der USA in Shippingport, Pennsylvania, elektrische Energie zu einem Preis von 21,8 Pfennig je Kilowattstunde erzeugen. Einer unkritischen Betrachtung erscheint diese Zahl sehr entmutigend, denn die meisten modernen Kohlekraftwerke kommen auf einen Preis von 2,5 Pfennig je Kilowattstunde. Diese 21,8 Pfennig ergeben ein falsches Bild, weil in ihnen ein großer Teil der für den Shippingport-Reaktor geleisteten Entwicklungsarbeit berücksichtigt ist. Wenn die erste Ladung Uran verbraucht ist und eine zweite Ladung folgt, nimmt der Preis stark ab, bei späteren Ladungen wird er noch niedriger, bis schließlich 5,9 Pfennig je Kilowattstunde erreicht werden.

Das andere Extrem findet man beim General Electric Reaktor in West Milton, New York; dort wurden Abkommen getroffen, daß den benachbarten Gemeinden elektrische Energie zu dem unglaublich niedrigen Preis von 0,8 Pfennig je Kilowattstunde geliefert wird. Diese Zahl ist völlig unrealistisch und leitet sich aus einer Kalkulation ab, die davon ausgeht, daß das Kraftwerk in Wirklichkeit für die Regierung betrieben wird, um mit diesem besonderen Reaktor Erfahrungen zu sammeln. Der Reaktor wird mit flüssigem Metall gekühlt und ist die Festland-Versuchsausführung des Reaktors, der für den Antrieb des Atom-U-Bootes „Sea Wolf“ entwickelt wurde und heute in diesem verwendet wird.

Die am meisten der Wirklichkeit entsprechenden Zahlen

finden sich nicht bei diesen Extremen, sondern bei Reaktoren, bei denen kein Plutonium an die Regierung verkauft wird und die auch nicht benützt werden, um etwas über den Antrieb von U-Booten zu erfahren. Man betrachtet besser einen ortsfesten Reaktor, dessen einziger Zweck es ist, zuverlässig und so billig wie derzeit möglich Energie zu erzeugen. Die von den großen Energiegesellschaften gebauten Reaktoren, wie wir sie behandelten, werden schließlich elektrische Energie zu einem Preis von 2,9 bis 3,8 Pfennig je Kilowattstunde erzeugen, bisher wurde das aber noch bei keinem dieser Reaktoren erreicht. Bei der Schätzung dieser Kosten handelt es sich nicht um optimistische Propaganda, sondern um eine vernünftige, gemäßigte, sorgfältige Vorhersage. Wir sehen also, daß die Kernreaktoren schon im heutigen Entwicklungsstadium der Atomenergie annähernd mit der Kohle konkurrieren können, sogar in den USA, wo die Kohle so reichlich vorhanden ist und so leicht abgebaut werden kann.

Die Wirtschaftlichkeit der Atomenergie außerhalb der USA

Auf Grund des eben Gesagten und der sich innerhalb der nächsten Jahrzehnte auf jeden Fall ergebenden Verbesserungen auf diesem sich schnell entwickelnden Gebiet kann man als sicher annehmen, daß nach dieser Zeit die Atomenergie auch in den USA wettbewerbsfähig wird. Außerdem kann sie in Ländern, in denen die fossilen Brennstoffe nicht so reichlich vorhanden sind wie in den USA, auch jetzt schon konkurrieren.

Als naheliegendes Beispiel wollen wir São Paulo, eine wichtige Industriestadt Brasiliens, betrachten. São Paulo ist eine moderne große Stadt mit einer Bevölkerung von ungefähr 3 Millionen. Der Großteil der benötigten Energie wird mit Generatoren erzeugt, zu deren Antrieb Dieselöl verwendet wird, das importiert werden muß. Auf diese Weise kommt die Kilowattstunde in São Paulo auf 6,3 Pfennig. Hier handelt es sich um einen Fall, in dem die Atomenergie sogar beim gegenwärtigen Entwicklungsstand erfolgreich mit dem Öl konkurrieren kann. Die Brasilianer sind deshalb stark an dem

Bau eines Atomkraftwerkes interessiert, nicht als Experiment, sondern einfach wegen der billigeren Energie. Obgleich die Einzelheiten noch nicht ganz bekannt sind, ist es fast sicher, daß das Atomkraftwerk für São Paulo von einer amerikanischen Gesellschaft gebaut wird.

Ähnlich wie in Brasilien könnte die Atomenergie auch heute schon in vielen anderen Ländern, in denen fossile Brennstoffe schwer verfügbar sind, erfolgreich mit Kohle und Öl in Wettbewerb treten. Mehr oder weniger in der Mitte zwischen den USA und Brasilien liegen die Verhältnisse in England. Das dort kürzlich in Betrieb gesetzte Atomkraftwerk in Calder Hall liefert elektrische Energie, die infolge der Verwendung konservativer natürlicher Uran-Graphit-Reaktoren ziemlich teuer ist. Weil aber die Kohle in England allmählich knapp und damit teurer wird, können diese ziemlich altmodischen Reaktoren mit kohlenbefeuerten Kesselanlagen konkurrieren. Die Calder-Hall-Reaktoren erzeugten von Beginn an elektrische Energie, deren Preis mit der durch Kohle erzeugten fast genau übereinstimmt, aber dies trifft nur für England zu, in den USA wären solche Reaktoren keinesfalls mit Kohleanlagen wettbewerbsfähig.

Es ist schwierig, in Fällen wie Calder Hall zuverlässige Zahlen anzugeben, denn die Regierung ist in hohem Maße beteiligt, und die Verwendung des im Reaktor erzeugten Plutoniums spielt für die Wirtschaftlichkeit der Energiegewinnung eine große Rolle. Die Atomwirtschaftler streiten zwar ausgiebig über die Einordnung einzelner Kostenfaktoren, aber die jeweiligen Endergebnisse unterscheiden sich doch nicht sehr. So wird die in Calder Hall gewonnene elektrische Energie etwa 5 Pfennig je Kilowattstunde kosten. Dieser Preis liegt ziemlich über dem, der für die in den USA in Bau befindlichen Atomkraftwerke erwartet wird, aber er ermöglicht in England den Wettbewerb mit der Kohle. Es ist erwähnenswert, daß, wenn in den USA die gleichen Reaktoren wie in Calder Hall gebaut würden, die von ihnen gelieferte Energie teurer wäre als in England, und zwar wegen der höheren Baukosten.

Die Möglichkeiten der Atomenergie sind für Länder, die arm an Energiequellen sind, von großem Anreiz. Es ist deshalb verständlich, daß die Wissenschaftler und Ingenieure

dieser Länder sich bei der Genfer Konferenz „Atome für den Frieden" im Jahre 1955 so sehr bemühten, Kenntnisse zu erwerben und die Hilfe der Länder zu gewinnen, denen Uran zur Verfügung steht. Reaktoren, die abgetrennte Isotope, also schweres Wasser oder U^{235} benützen, haben gegenüber Reaktoren, die nur natürliche Stoffe verwenden, große Vorteile. Abgetrennte Isotope sind also für ein Land, das ein Atomenergieprogramm aufbauen will, von sehr großer Bedeutung. Diese Länder könnten Brutreaktoren bauen; müssen aber zuerst abgetrennte Isotope erzeugt werden, so verzögert sich das Programm um viele Jahre, und seine Kosten steigen um ein Vielfaches. Große Länder mit Vorräten an abgetrennten Isotopen können also kleine Länder bei der Aufnahme des Atomenergie-Geschäftes sehr unterstützen.

Natürlich braucht man noch viel mehr als nur abgetrennte Isotope. Der Bau und der Betrieb von Kernreaktoren ist eine sehr komplizierte Sache, für die diese Länder gewöhnlich nicht die nötigen Ingenieure und Wissenschaftler zur Verfügung haben. Es ist eine schwierige Aufgabe, außer für alle notwendigen Isotope auch noch für die Ausbildung und das Personal sorgen zu müssen. Wir werden diese komplizierten Probleme der internationalen Zusammenarbeit noch gegen Ende unseres Buches behandeln.

Man kann schwer sagen, wie schnell die Atomenergie in den Ländern, die sie dringend benötigen, benützt werden wird. Es ist etwas paradox, daß wir viel besser sagen können, wie schnell sich die Atomenergie in den USA und in England, wo andere Energiequellen eher verfügbar sind, ausbreiten wird. Die in Genf angegebene Schätzung besagte, daß in den USA bis zum Jahre 1970 zehn Prozent der elektrischen Energie atomar erzeugt werden. Nach Voraussagen in England soll bis zum Jahre 2000 mehr als die Hälfte der Energie Großbritanniens atomar erzeugt werden. In Rußland, das wie die USA reiche natürliche Energiequellen besitzt, werden bis 1960 einige Milliarden Kilowatt elektrischer Leistung atomar erzeugt werden; für die fernere Zukunft wurden keine Voraussagen gemacht.

Wegen des großen Bedarfs an elektrischer Energie, der heute in der Welt besteht, wurde auf die Schätzung der An-

wendbarkeit von Atomenergie für Antriebszwecke, im ganzen gesehen, nicht viel Mühe verwendet. Atommotoren zum Antrieb von Schiffen, U-Booten und Flugzeugen finden heute nur militärische Verwendung. Man kann diese Motoren vielleicht auch für zivile Zwecke gebrauchen, aber ihre derzeitigen Kosten sind so hoch, daß in wirtschaftlicher und technischer Hinsicht ortsfeste Atomkraftwerke der Menschheit sicher mehr unmittelbaren Gewinn bringen als atomar angetriebene Fahrzeuge.

Bedenkt man alle die Schwierigkeiten, die mit der atomaren Gewinnung elektrischer Energie verbunden sind, so könnte man meinen, daß die Voraussagen der Fachleute unangebracht optimistisch sind. Aber in der Wissenschaft und Technik scheinen sich die Dinge noch schneller zu entwickeln, als der größte Optimismus der Fachleute erwarten läßt. Es ist gut, sich in diesem Zusammenhang an die Jahre 1944 und 1945 zu erinnern, als die Atomwissenschaftler in den wenigen Minuten Zeit, die ihnen die Arbeit an der Atombombe ließ, über die Möglichkeiten der friedlichen Anwendung der Kernenergie nachzudenken pflegten. Sie konnten so viele Schwierigkeiten voraussehen, daß manche dachten, daß die Atomenergie nie zu einer praktisch brauchbaren Energiequelle werden würde. Diejenigen von uns, die an diesen Diskussionen teilgenommen haben, sind sicherlich verblüfft, was für ein Fortschritt in nur 12 Jahren erzielt wurde. Vielleicht wird der Fortschritt in der wirtschaftlichen Anwendung der Atomenergie die heute bedeutend größere Anzahl von Experten, welche die gleichen Probleme diskutieren, auch überraschen. Aber bevor wir uns allzusehr bemühen, einen Blick in die Zukunft zu werfen, wollen wir uns den vielen anderen Vorteilen zuwenden, welche die Atomenergie der Menschheit heute bringt, Vorteile, die nicht aus der bei der Kettenreaktion gewonnenen Wärmeenergie, sondern aus den Neutronen und der Strahlung herrühren. Obwohl sie nicht so viel publiziert werden, könnten sie sich letzten Endes für die Menschheit als eine weit größere Wohltat erweisen als Kilowattstunden.

V

NEUTRONEN AUS KERNREAKTOREN

> Es gehört zu den Aufgaben eines Wissenschaftlers, daß er nicht nur neue Erkenntnisse findet und sie seinen nächsten Kollegen mitteilt, sondern daß er auch versucht, dieses neue Wissen in aufrichtigster und deutlichster Weise all denen zugänglich zu machen, die sich um ein Verständnis bemühen.
>
> *J. R. Oppenheimer, „The Open Mind"*
> *(Simon and Schuster, New York, 1955)*

Wir haben ziemlich ausführlich behandelt, auf welche Weise eines der Produkte der Kettenreaktion, die Wärmeenergie, in immer zunehmendem Maße zur Gewinnung elektrischer Energie benützt wird. Wir wenden uns nun einem anderen Produkt der Kettenreaktion zu, den Neutronen und ihren vielen nützlichen Anwendungen in der Grundlagenforschung, der Technik und der Medizin.

Zweifellos ist die am weitesten verbreitete Anwendung der Neutronen die zur Gewinnung von Radioisotopen. Die Vielzahl der Radioisotope und ihrer Verwendungsmöglichkeiten ist so ungeheuer groß, daß wir für die Erklärung ihrer Eigenschaften und Anwendungen das ganze 6. Kapitel verwenden werden. Bezüglich der Herstellung von Radioisotopen sind die Neutronen selbst nicht von großem Interesse, denn die Radioisotope sind genauso nützlich, wenn sie auf andere Weise, z. B. mit einem Zyklotron, hergestellt werden. In erster Linie wichtig sind die Radioisotope selbst und ihre weitreichenden Anwendungen, nicht die Herstellungsart. In diesem Kapitel betrachten wir aber die Neutronen nicht als Mittel zum Zweck, sondern um ihrer eigenen Bedeutung willen. Unmittelbar untersucht und angewendet werden die Neutronen vor allem in der sogenannten *Grundlagenforschung*. Es ist gut, wenn wir

diesem Gebrauch der Neutronen etwas Zeit widmen, nicht nur wegen der Wichtigkeit der Neutronen-Experimente, sondern auch weil wir hier Gelegenheit haben, durch einen ihrer Zweige, nämlich die Kernphysik, etwas über die Natur der Grundlagenforschung zu erfahren.

Der Gebrauch von Neutronen in der Grundlagenforschung

Die Grundlagenforschung beschäftigt sich in der Kernphysik mit den Gesetzen, die der Struktur der Materie zugrunde liegen, mit den Gesetzen, die aussagen, wie die Elementarteilchen aufeinander einwirken, und mit der Art und Weise, wie die Elementarteilchen Kerne, Atome und Moleküle aufbauen. Die Grundlagenforschung hat als Ziel nur die Erforschung der Struktur der Materie, also keine praktischen Anwendungen, sie wird deshalb manchmal spaßhaft „nutzlose Forschung" genannt. Diese Definition ist nicht nur witzig, sondern sie weist richtig darauf hin, daß Wissenschaftler bei der Durchführung von Grundlagenforschung keinen praktisch verwertbaren Erfolg vor Augen haben; ihre wahre Antriebskraft ist die Wißbegierde. Es hat sich aber ausnahmslos erwiesen, daß auch die reinste Grundlagenforschung zwangsläufig wertvolle praktische Konsequenzen hat. Die Wissenschaftler wissen dies auch, aber es ist *nicht* ihre Triebfeder.

Eine bessere Beschreibung der Grundlagenforschung erzielt man wahrscheinlich, wenn man nicht die Motive betrachtet, sondern die umfassende Gültigkeit der dabei entdeckten Naturgesetze. Ein entdecktes Prinzip ist um so bedeutender, je umfassender es die Struktur und das Verhalten der Materie erklärt. Obwohl es zutrifft, daß gewöhnlich tiefgreifende Prinzipien von einer praktischen Anwendungsmöglichkeit weit entfernt sind, kann dieser Zusammenhang doch nicht als eine grundsätzliche Eigenschaft der Grundlagenforschung angesehen werden.

Die Neutronen sind für die Grundlagenforschung so geeignet, weil sie mit den elementaren Bestandteilen der Materie leicht in Wechselwirkung treten und uns auf diese Weise über den Aufbau der Materie aus den Elementarteilchen aufklären.

Die grundsätzliche und weitreichende Natur der mit Hilfe von Neutronen gewonnenen Erkenntnisse über die Materiestruktur macht es etwas schwierig, diese Entdeckungen und ihre Bedeutung zu beschreiben. Die Schwierigkeit erwächst daraus, daß die Eigenschaften der kleinsten Teilchen der Materie von denen der makroskopischen Objekte oft wesentlich verschieden sind und ihre Darstellung daher etwas wissenschaftliche Gründlichkeit erfordert. Aber die Eigenschaften, über die berichtet wird, sind so ungemein interessant, daß sich die Mühe, sie — trotz einiger Schwierigkeiten mit theoretischen Begriffen — verstehen zu wollen, lohnt.

Bei der Erklärung der Grundlagen werden wir ab und zu darauf hinweisen, wie entdeckte Naturgesetze oft sehr schnell praktische Bedeutung erreichen, obgleich die Triebfeder der Forschung die Beherrschung der grundlegenden Naturgesetze als solche ist.

Ob schnell oder nicht, eine praktische Verwendung scheint zwangsläufig zu folgen. Wenn auch die Geschichte über Faraday, den englischen Physiker, schon oft erzählt wurde, verdient sie in diesem Zusammenhang ein weiteres Mal wiederholt zu werden. Eine Frau beobachtete Faraday bei einigen seiner Experimente, mit denen er die Grundlagen des Elektromagnetismus entdeckt hatte, die zur Entwicklung der gesamten Starkstromtechnik führten. Ziemlich wenig beeindruckt von den einfachen Experimenten, fragte die Dame Faraday: „Aber was hat das für einen Zweck?" Darauf antwortete er: „Madame, was für einen Zweck hat ein Baby?"

Obgleich es etwas mißlich ist, daß die finanzielle Unterstützung der Grundlagenforschung oft nur unter Hinweis auf die zwangsläufige praktische Verwertung erfolgt, sollte man nicht in das andere Extrem verfallen, daß die Grundlagenforschung, sobald sie mit praktischen Möglichkeiten verbunden ist, irgendwie weniger wertvoll oder hochstehend ist. Am besten machen wir uns klar, daß es Wissenschaftler gibt, die, völlig uninteressiert an Anwendungen, die Grundlagenforschung um ihrer selbst willen betreiben und daß andere die so erhaltenen Resultate dazu verwenden, das materielle Wohlergehen der Menschen zu fördern.

Neutronen — schnelle und langsame

Seit der Entdeckung der Neutronen im Jahre 1932 hat sich ihre Verwendung in der Grundlagenforschung so ausgedehnt, daß ein eigener Zweig der Physik entstand — die *Neutronenphysik*. Die Neutronen sind von großem Wert, weil sie ein Werkzeug zur Erforschung der Materie darstellen. Der Hauptgrund für ihre umfassenden Verwendungsmöglichkeiten ist, daß sie über einen extrem großen Bereich ihrer Energie mit Kernen in Wechselwirkung treten können. Der Bereich erstreckt sich von Neutronen, die sich bedeutend langsamer bewegen als die Materieatome bei ihrer Wärmebewegung, bis zu Neutronen, die so schnell sind, daß die Kerne für sie teilweise „durchlässig" werden. Der Grund, warum Neutronen so sehr verschiedener Energie in starke Wechselwirkung mit Kernen treten, ergibt sich unmittelbar aus der Tatsache, daß das Neutron keine elektrische Ladung hat.

Weil das Neutron keine elektrische Ladung hat, kann es sich auch bei sehr langsamer Bewegung einem Kern nähern und in diesen eindringen. Einem elektrisch geladenen Teilchen, z. B. dem positiv geladenen Proton, würde dies nicht gelingen, es würde von der positiven Ladung des Kerns abgestoßen werden. Ein Proton kann also in den Kern nur eintreten, wenn es sich mit großer Geschwindigkeit bewegt, d. h. eine Energie von der Größenordnung einer Million Elektronenvolt hat. Ein Elektron negativer Ladung würde von dem Kern natürlich angezogen, es ist aber wegen seines geringen Einflusses auf Kernteilchen nicht zur Untersuchung von Kernwechselwirkungen geeignet. Bei langsamer Bewegung werden die Eigenschaften aller Teilchen sehr kompliziert und in gewisser Weise unbestimmt, so daß die möglichen Wechselwirkungen der Neutronen mit Kernen sehr zahlreich werden.

Um das weite Gebiet der Wechselwirkungen von Neutronen deutlich zu machen, zeigen wir in Fig. 24 den großen Energiebereich, in dem Neutronen zur Untersuchung von Materie verwendet werden können. Um große Energiebereiche darstellen zu können, wurde ein besonderer Maßstab benützt — auf der Energieskala entsprechen gleiche Abstände einer jeweiligen Multiplikation der Energie mit dem Faktor 10; eine solche

Skala bezeichnet man als *logarithmisch.* Die niedrigste angeführte Energie beträgt 10^{-4} Elektronenvolt, also 0,0001 Elektronenvolt, eine „eins" vier Stellen nach dem Komma, die höchste Energie beträgt 10^8, eine „eins" gefolgt von acht Nullen (100 000 000). Es ist nicht überraschend, daß ein so breites brauchbares *Spektrum* der Neutronenenergie die Aufklärung vieler Einzelheiten der Materiestruktur ermöglicht. Die zur Aufklärung benützten Erscheinungen sind sehr verschieden, dabei finden Neutronen des gesamten Energiebereiches Anwendung.

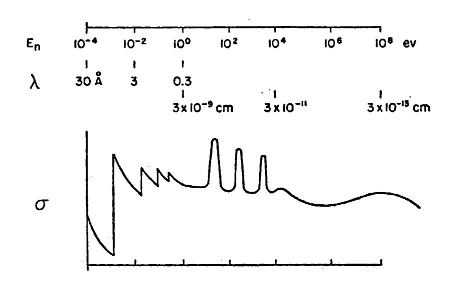


Fig. 24. Die Darstellung des Energiebereiches, in dem die in einem Reaktor vorkommenden Neutronen liegen, auf einer logarithmischen Energieskala. Ebenfalls angegeben sind die entsprechenden Wellenlängen λ (Lambda) und die Abhängigkeit des Wirkungsquerschnittes σ (Sigma) von der Energie bzw. Wellenlänge des Neutrons.

Die Neutronen zeigen wie alle Materieteilchen eine Eigenschaft, die zwar sehr schwer vorstellbar, aber heute endgültig erwiesen ist: ihr Verhalten bei langsamer Bewegung entspricht mehr einer Welle als einem Teilchen. Dem Neutron kommt immer eine bestimmte *Wellenlänge* zu. Wenn die Energie, also auch die Geschwindigkeit des Neutrons, sehr groß ist, hat es eine so kleine Wellenlänge, daß es sich praktisch wie ein Teilchen verhält. Mit abnehmender Geschwindigkeit nimmt die Wellenlänge und damit das wellenmäßige Verhalten des Neutrons zu. Sehr langsame Neutronen schließlich gleichen eher Lichtwellen als festen Teilchen.

Die Wellenlängen λ, die Neutronen verschiedener Energie zukommen, sind der Energieskala entsprechend ebenfalls in Fig. 24 dargestellt. Im Rahmen der gewöhnlichen Abmessungen sind alle Wellenlängen der Fig. 24, sogar die größte mit 3×10^{-7} cm, also die Wellenlänge der Neutronen niedrigster Energie, extrem klein. Doch im Vergleich zu den Abständen von Atomen oder zur Größe von Atomkernen ist diese Wellenlänge sehr groß. Sie ist etwa 1 Million mal größer als der Kerndurchmesser und etwa 10- bis 100mal größer als der Abstand von Atomen in Materie. Die Wellenlängen von Fig. 24 sind teilweise in Angström-Einheiten (1 Å $= 10^{-8}$ cm) angegeben, weil diese Längeneinheit ungefähr den Atomabständen in festen Stoffen entspricht. Die aufgeführte Wellenlänge von 30 Å ist im atomaren Maßstab so groß – sie entspricht etwa dem dreißigfachen Atomabstand –, daß die zugehörigen Neutronen beim Durchgang durch Materie von der geradlinigen Ausbreitung in der gleichen Weise wie Lichtwellen abweichen, ebenso können sie an einer glatten Oberfläche reflektiert werden, wie Licht an einem Spiegel. Nimmt die Energie des Neutrons zu, so nimmt seine Wellenlänge entsprechend ab, mit anderen Worten, die Größe des Neutrons verringert sich. Mit der Größe ändert sich die Art der Wechselwirkung mit Materie, und zwar auf komplizierte Weise, wie wir im folgenden sehen werden.

Neutronen-Wirkungsquerschnitte

Wegen der großen Verschiedenheit der Neutronen-Wechselwirkungen erfordert ihre Beschreibung eine eindeutige quantitative Methode. Die Art des Vorgehens erläutert Fig. 24, die dort dargestellte Kurve zeigt die Wahrscheinlichkeit der Wechselwirkung eines Neutrons mit einem Kern in Abhängigkeit von der Energie des Neutrons. Für diese Vorstellung wurde kein spezieller Kern, sondern das durchschnittliche, für viele Kerne typische Verhalten gewählt. Diese Wahrscheinlichkeit bezeichnet man stets als *Wirkungsquerschnitt*, den man sich ausreichend genau als die vom sich nähernden Neutron aus gesehene Querschnittsfläche des Kerns denken kann. Je größer

der Kern ist, um so größer ist die Chance, daß er von dem Neutron getroffen wird.

Da der Querschnitt eine Fläche darstellt, kann er in Quadratzentimetern ausgedrückt werden, natürlich auch in einer anderen Flächeneinheit. Unabhängig von der benützten Einheit oder Sprache ist das Symbol für den Wirkungsquerschnitt stets der griechische Buchstabe „Sigma", σ. Die wegen der Kleinheit der Kerne tatsächlich benützte Einheit ist 10^{-24} Quadratzentimeter, nach dem Komma folgen also 23 Nullen und eine 1. Diese Einheit bezeichnet man als „barn" (Anm. d. Übersetzers: zu deutsch „Scheune"), eine Benennung, die aus den frühen Tagen der Kernphysik stammt und ausdrücken sollte, daß ein Kern gegenüber einem Neutron so „groß wie eine barn" ist. Dieser Ausdruck hat sich über die ganze Welt verbreitet, und zu unserem großen Erstaunen wurden auf der Genfer Konferenz „Atome für den Frieden" von 1955 die russischen Wirkungsquerschnitte in „barn" angegeben, unter Benützung der entsprechenden russischen Schriftzeichen, aber mit einer Aussprache wie irgendeine Iowa (Anm. d. Übers.: Staat in USA) barn, trotz des rollenden „r".

Obgleich sich die tatsächliche Größe eines Kerns mit der Geschwindigkeit der Neutronen offensichtlich nicht ändert, *verhält* er sich doch so, als wäre dies der Fall, wenn es auch sehr schwer vorstellbar ist. Die Beschreibung dieser Veränderung wird ein wenig genauer, wenn man sagt, daß sich die Größe des Neutrons und deshalb in ähnlicher Weise die Chance, daß es einen Kern trifft, mit der Energie ändert. Neben der gleichmäßigen Veränderung der Neutronengröße mit der Energie muß berücksichtigt werden, daß Kerne infolge ihrer Struktur nur Neutronen bestimmter Energien stark absorbieren; dies verursacht die in Fig. 24 gezeigten plötzlichen Änderungen des Wirkungsquerschnittes.

Aus der in Fig. 24 dargestellten Kurve geht hervor, daß sich die Wahrscheinlichkeit der Wechselwirkung mit Materie bei großer Energie ziemlich langsam ändert. Anders ist es bei den mittleren Energien, hier steigt und fällt der Wirkungsquerschnitt rasch, die dabei entstehenden typischen Kurvengipfel bezeichnet man als *Resonanzen.* Sie entstehen, wenn die Energie des Neutrons gerade so groß ist, daß in dem Kern

eine bestimmte Frequenz angeregt wird. Bei dieser Neutronenenergie oder Wellenlänge erfolgt eine starke Absorption, gerade so, wie die Lautstärke eines Radioapparates groß wird, wenn er auf die genaue Frequenz oder Wellenlänge einer bestimmten Sendestation eingestellt wird.

Ist die Energie des Neutrons geringer als im Resonanzbereich, so treten wir in einen Bereich ein, in dem der Wirkungsquerschnitt plötzlich abfällt, langsam ansteigt, wieder abfällt, ansteigt usw. und auf diese Weise eine „Sägezahn"-Kurve bildet. Bei dem letzten plötzlichen Abfall fällt der Wirkungsquerschnitt auf einen sehr kleinen Wert, und das Material wird für Neutronen dieser Energie fast „durchlässig". Abfälle treten jeweils dann auf, wenn die Wellenlänge des Neutrons größer wird als einer der im Stoff vorkommenden Atomabstände, weil die Streuung der Neutronen durch die Atome dann viel geringer ist. Der letzte Abfall tritt ein, wenn die Wellenlänge größer wird als der größte Atomabstand. Bei noch kleineren Energien nimmt der Wirkungsquerschnitt wieder zu und steigt jetzt mit abnehmender Geschwindigkeit der Neutronen immer weiter an. Dieses Verhalten erklärt sich daraus, daß die Atome des Materials sich bei ihren Schwingungen schneller bewegen als diese langsamen Neutronen, auf diese Weise mit den Neutronen zusammentreffen und sie aus dem Material hinausstoßen. Je langsamer sich ein Neutron bewegt, um so länger ist es offensichtlich im Material und um so größer ist damit die Wahrscheinlichkeit der Wechselwirkung.

Die Kurve in Fig. 24 entspricht einem einfachen, typischen Stoff. Würde es sich um einen magnetischen Stoff, z. B. Eisen, handeln, so würde der Verlauf der Kurve komplizierter werden. Das Neutron hat nämlich keine elektrische Ladung, aber es ist mit einem schwachen magnetischen Feld verbunden, stellt also einen kleinen Magneten dar. Dieser wird durch magnetische Felder, wie sie z. B. in Eisen vorhanden sind, beeinflußt, und dadurch entsteht eine komplizierte Abhängigkeit des Wirkungsquerschnittes von den magnetischen Eigenschaften. Auf diese Weise kann man mit Neutronen auch die magnetische Struktur der Materie untersuchen.

In Anbetracht der starken Abhängigkeit, die zwischen der Neutronenenergie und der Art der Wechselwirkung besteht, kann es etwas überraschen, daß die einen sehr großen Energiebereich umfassenden Neutronen eines Reaktors so ausgewählt werden können, daß man mit ihnen eindeutige Resultate erhält. Der Besuch eines modernen Forschungsreaktors mit seinen vielen Versuchsapparaturen zeigt uns eindrucksvoll, daß das Auswählen bestimmter Neutronenenergien, der Hauptzweck dieser Apparaturen, eine ungeheure Aufgabe ist. Als Ersatz für den wirklichen Besuch zeigt uns Bild 25 einen Teil des natürlichen Uran-Graphit-Reaktors in Brookhaven; es vermittelt einen ungefähren Eindruck der Vielzahl der Geräte. Die Wand des Reaktors befindet sich links, man sieht in ihr einige Austrittsöffnungen von Strahlkanälen; letztere sind, wenn sie nicht benützt werden, mit großen Pflöcken verschlossen. Die Wissenschaftler arbeiten gerade mit einer Anordnung, bei der ein Neutronenstrahl an einer Flüssigkeitsoberfläche reflektiert wird.

Die in einem Forschungsreaktor herrschende Neutronenverteilung ermöglicht es, durch geeignete Wahl der Arbeitsstelle im Reaktor eine gewisse Auswahl der Neutronenenergie zu erreichen. Fig. 26 zeigt in stark vereinfachter Form den wesentlichen inneren Aufbau des Brookhaven-Reaktors. Die Neutronen größter Energie, die noch nicht abgebremsten Spaltneutronen, finden sich in größter Intensität im mittleren Teil des Reaktors, den man gewöhnlich als *Gitter* oder *Reaktorkern* bezeichnet. Hier findet die Kettenreaktion statt. Experimente, welche die volle Intensität dieser schnellen Neutronen erfordern, müssen im Reaktorkern durchgeführt werden. Ein Beispiel für diese Art von Experimenten sei kurz angegeben; bei ihm wird durch schnelle Neutronen ein Teil der Atome eines Stoffes *verlagert,* also aus der normalen Lage herausgeschlagen. Dabei ergeben sich überraschende Veränderungen der physikalischen Eigenschaften des Stoffes.

Bei dem üblichen Forschungsreaktortyp, wozu auch der von Fig. 25 (Tafel) gehört, findet man Neutronen *aller* Energien mit größter Intensität im Reaktorkern. Erfordert ein Experiment

die größtmögliche Neutronenintensität, so muß es im Reaktorkern durchgeführt werden, auch wenn die Anwesenheit von Neutronen unerwünschter Energie die Arbeit erschwert. Durch Einführen von Materialproben in den Reaktorkern kann die in ihm vorhandene große Neutronenintensität zur Bestrahlung verwendet werden; dazu sind manchmal recht umfangreiche Vorrichtungen notwendig. Die Schwierigkeiten beim Arbeiten im Reaktorkern sind so groß, daß gewöhnlich auf den Vorteil großer Intensität verzichtet werden muß und die Experimente, wenn möglich, außerhalb des Reaktorkerns mit Hilfe von Strahlkanälen durchgeführt werden. Ein *Strahlkanal* ist ein langer, durch die Abschirmung bis in den Reaktorkern geführter Kanal. Der durch den Kanal aus dem Reaktor tretende Strahl besteht aus einem Gemisch von Neutronen aller Energien und aus einer starken Gamma- und Betastrahlung.

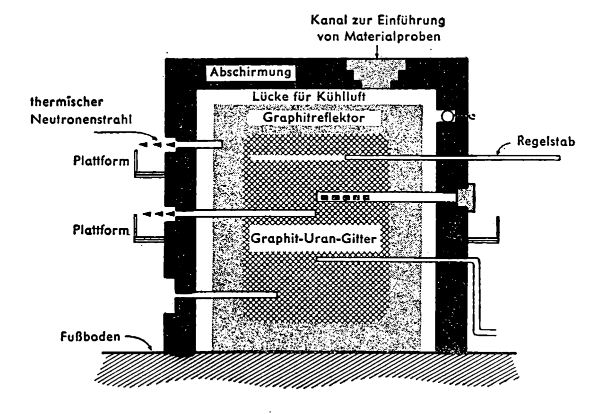


Fig. 26. Eine schematische Zeichnung des Forschungsreaktors in Brookhaven, die deutlich macht, wie in dem Reaktor Materialproben bestrahlt werden und wie er Neutronenstrahlen liefert.

Die Intensität in einem solchen Strahl ist zwar bedeutend geringer als im Reaktorkern, aber die günstige Lage außerhalb der Reaktorabschirmung gestattet die Verwendung ausgedehnter Apparaturen zur Auswahl von Neutronen gewünschter Energie. Fig. 26 zeigt uns, daß die Strahlkanäle im

Reaktor verschieden angebracht werden können, z. B. im *Reflektor,* in dem die Intensität der schnellen Neutronen nur mehr gering ist, die der thermischen aber noch relativ groß. Durch die Verwendung bestimmter Kanaltypen kann also eine gewisse Auswahl der Neutronenenergie erfolgen; für genaue Experimente ist es aber gewöhnlich notwendig, die Neutronen nach ihrem Austritt aus dem Reaktor mit größerer Genauigkeit auszusondern.

Wirkungen schneller Neutronen auf Materie

Um die bemerkenswert vielseitigen Verwendungsmöglichkeiten von Neutronen zu zeigen, behandeln wir jetzt einige besondere Experimente mit Reaktorneutronen. Wir beginnen bei den Neutronen höchster Energie und enden bei denen von extrem niedriger Energie, den „kalten" Neutronen. Es handelt sich um Experimente der Grundlagenforschung; Hauptziel ist fast stets, etwas über die allgemeinen Gesetze zu erfahren, die das Verhalten von Neutronen, Protonen, Kernen, Atomen und Molekülen beherrschen. Weil die erhaltenen Erkenntnisse oft sehr schnell praktische Anwendung finden, ist es manchmal schwierig zu entscheiden, ob die Erforschung der Materiestruktur oder die praktische Anwendung maßgebend waren. Aber unabhängig von den Beweggründen zeigen diese Experimente, wie mit den heute verfügbaren, noch vor zwei Jahrzehnten unvorstellbaren starken Neutronenquellen aufgeklärt werden kann, wie Neutronen und Protonen Kerne bilden und welcher Art die Wechselwirkungen zwischen den Atomen der verschiedenen Stofftypen sind.

Bewegen sich schnelle Neutronen durch Materie, so stoßen sie mit Atomen zusammen und stoßen diese von ihrem Platz innerhalb der regelmäßigen, *kristallinen* Anordnung, die für die meisten festen Körper typisch ist. Weil zwischen solchen *verlagerten,* also aus ihrer normalen Lage entfernten Atomen und den physikalischen Eigenschaften fester Körper, wie Härte und die Fähigkeit, Wärme und Elektrizität zu leiten, ein enger Zusammenhang besteht, tritt durch die Bestrahlung mit Neutronen eine merkliche Veränderung dieser Eigenschaften ein.

Um solche Veränderungen zu erreichen, ist es notwendig, in der kristallinen Substanz eine erhebliche Anzahl von Atomen zu verlagern; das erfordert aber die Verwendung energiereicher und sehr vieler Neutronen. Man kann also diese *Bestrahlungswirkungen* praktisch nur dadurch erzeugen, daß man die Stoffprobe im Reaktorkern am besten in der Nähe eines der Uran-Brennstoffelemente anbringt. Weil man gewöhnlich verhindern muß, daß die verlagerten Atome wieder in die regelmäßige, also kristalline Anordnung zurückkehren, ergeben sich große experimentelle Schwierigkeiten.

Wird die zu untersuchende Stoffprobe erhitzt, so bewegen sich ihre Atome schneller und finden leichter in die kristalline Anordnung zurück. Um die durch Neutronenbestrahlung erzeugte Wirkung zu bewahren, muß die Probe während und nach der Bestrahlung auf niedriger Temperatur gehalten werden. Befindet sich die Probe im Reaktorkern, wo ständig ungeheuer viel Wärmeenergie erzeugt wird, so muß sie durch entsprechende Vorrichtungen stark gekühlt werden, z. B. mit flüssiger Luft, die man ständig durch den Reaktor fließen läßt. Diese sehr großen experimentellen Schwierigkeiten sind überwunden worden, die dafür aufgewendete Mühe wurde durch die erhaltenen, wichtigen Ergebnisse reichlich belohnt. Ein Beispiel für die interessanten, durch Bestrahlung erzielten Ergebnisse bietet die *Bestrahlungshärtung*. Es wurde gezeigt, daß ein typisches Metall durch Bestrahlung mit Neutronen härter wird und die Härtung sehr ähnlich der durch die bekannte Kaltverformung erzielten ist. Unter Kaltverformung versteht man eine mechanische Deformierung des nichterhitzten Metalls, z. B. durch einen Hammerschlag. Das überraschende und wichtige Ergebnis ist also, daß die Zunahme der Härte eines Metalls auf der Verlagerung von Atomen zu beruhen scheint, wobei es gleichgültig ist, ob diese durch Neutronenbeschuß oder durch Verschiebung großer Materialstücke bei der Kaltverformung erreicht wird.

Die Wirkungen der Bestrahlung, wie z. B. die Härtung eines Metalls, können durch Erhitzen des Materials oft rückgängig gemacht werden, weil die verlagerten Atome dabei auf ihre Plätze zurückfinden. Bei einem Metall bezeichnet man dieses mit einer Veränderung der physikalischen Eigenschaf-

Fig. 21. Ein vorgeschlagenes Atomkraftwerk mit zwei Natrium-Graphit-Reaktoren, in denen als Bremsmittel Graphit und als Kühlmittel flüssiges Natrium verwendet wird (North American Aviation, Inc.).

Fig. 25. Die Ansicht eines Teiles des im Brookhaven-National-Laboratorium befindlichen Forschungsreaktors, welche die vielen Strahlkanäle und die zugehörigen Versuchsapparaturen zeigt.

Fig. 27. Der am Reaktor in Brookhaven benutzte schnelle Unterbrecher. Der Rotor macht in der Minute 10 000 Umdrehungen und erzeugt so Neutronenimpulse sehr kurzer Dauer, deren Geschwindigkeit elektronisch gemessen wird.

Fig. 29. Die Versuchsapparatur, die für die Untersuchung der Struktur von Kristallen mit Hilfe der Neutronenbeugung benutzt wird.

ten verbundene Erhitzen als Ausglühen. Es ist offensichtlich, daß diese grundlegenden Untersuchungen der Härte von Metallen praktische Anwendungen finden. Direkt anwendbar sind sie zum Erlangen eines besseren Verständnisses industrieller Verfahren, die zur Herstellung einer Unzahl verschiedener Metallarten dienen. Die im Laufe vieler Jahre entwickelten Verfahren beruhen zum großen Teil auf Erfahrung und haben keine wissenschaftliche Grundlage, weil die dabei auftretenden Vorgänge nur unvollständig verstanden werden. Gelingt also mit Hilfe von Neutronen die Aufklärung der zugrunde liegenden Vorgänge, so können die für die Herstellung der gewünschten Metallarten erforderlichen Verfahren schneller gefunden werden.

Der schnelle Unterbrecher

Wir haben bereits behandelt, daß für Neutronen mittlerer Energie der Wirkungsquerschnitt sehr stark und auf komplizierte Weise von der Energie des Neutrons abhängt. Für ganz bestimmte Energien findet eine extrem starke Absorption statt, so entstehen die steilen Gipfel der in Fig. 24 gezeigten Wirkungsquerschnittskurve. Will man diese Gipfel des Wirkungsquerschnittes, die man als *Resonanzen* bezeichnet, untersuchen, so braucht man offensichtlich Neutronen mit genau bestimmter Wellenlänge oder Energie.

Die für die Untersuchung der schmalen Resonanzen notwendige genaue Bestimmung der Neutronenenergie schließt die Benützung von Neutronen innerhalb des Reaktors aus. Die umfangreichen, für die Auswahl der Neutronen erforderlichen Apparaturen haben nur außerhalb des Reaktors Platz. Man braucht also einen aus dem Reaktor austretenden Neutronenstrahl. Dieser besteht aus Neutronen sehr verschiedener Energie, aber mit Hilfe genauer Geschwindigkeitsselektoren können die einzelnen Energien ausgesucht werden.

Eine wichtige Methode, Neutronen bestimmter Geschwindigkeit zu erhalten, beruht darauf, die Zeit zu messen, welche die Neutronen zum Zurücklegen einer vorgegebenen Strecke brauchen. Ermöglicht wird diese Zeitmessung durch einen

sogenannten *„schnellen Unterbrecher"*, eine mechanische Vorrichtung, die den Neutronenstrahl jeweils nur während sehr kurzer Zeit durchläßt und so *Neutronenimpulse* von sehr kurzer Dauer, etwa einer millionstel Sekunde, erzeugt. Den Mechanismus des im Brookhaven-Laboratorium benützten schnellen Unterbrechers zeigt Fig. 27 (Tafel). Er besteht aus einer schnell rotierenden Scheibe, die Schlitze enthält. Hat die Scheibe eine Stellung, in der die durch die Schlitze freigegebene Richtung mit der des Neutronenstrahls zusammenfällt, so können die Neutronen durch die Schlitze hindurchtreten. Weil sich die Scheibe sehr schnell drehen muß, ist sie in einer luftleeren Kammer untergebracht, um die sehr hinderliche Luftreibung zu vermeiden. Durch die sehr schnelle Drehung des Unterbrechers — etwa 10 000 Umdrehungen je Minute — wird der Neutronenstrahl, während sich die Schlitze durch ihn bewegen, nur etwa 1 millionstel Sekunde freigegeben. Während sich der so erzeugte Neutronenimpuls auf den etwa 30 Meter entfernten Neutronenzähler zu bewegt, überholen die schnellen Neutronen die langsamen. Die Zeit, zu der die Neutronen den Zähler erreichen, ist also ein Maß für die Geschwindigkeit, also auch die Energie der Neutronen. Durch Anwendung hochentwickelter elektronischer Zeitmeßinstrumente ist es möglich, bei einem Versuch 1000 verschiedene Energiegruppen zu registrieren.

Würde man den Neutronenimpuls die 30 Meter zwischen Unterbrecher und Zähler in Luft zurücklegen lassen, so würden viele Neutronen an Luftmolekülen gestreut werden und für das Experiment verlorengehen; daher bringt man auf dieser Strecke einen mit Helium gefüllten Plastikballon an. Der Streuwirkungsquerschnitt von Helium ist so klein, daß praktisch keine Neutronen verlorengehen.

Neutronenresonanzen

Um die Wechselwirkung eines Stoffes mit Neutronen verschiedener Geschwindigkeiten zu messen, läßt man den Neutronenstrahl in der Nähe des Unterbrechers auf eine kleine Probe des betreffenden Stoffes treffen und mißt anschließend

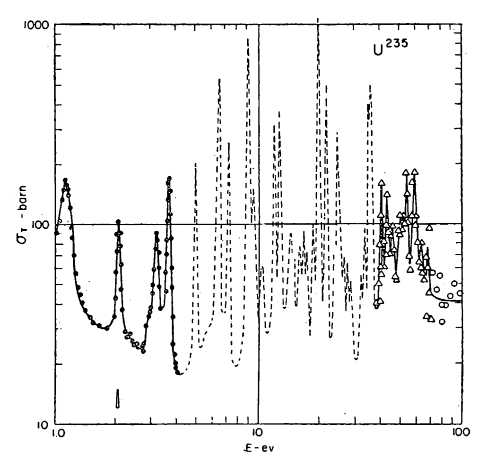


Fig. 28. Die komplizierte Wirkungsquerschnittskurve des wichtigen U^{235}-Isotops, wie sie mit dem schnellen Unterbrecher der Fig. 27 gemessen wurde. Im mittleren Teil der Kurve, um 10 Elektronenvolt, ist die Struktur so kompliziert, daß die einzelnen Meßpunkte nicht gezeigt werden können.

die Geschwindigkeitsverteilung der Neutronen. Hat die Zahl der Neutronen mit einer bestimmten Energie relativ stark abgenommen, so hat der Neutronenwirkungsquerschnitt des betreffenden Stoffes für diese Energie eine Resonanz. Die in Fig. 28 gezeigte Resonanzstruktur des U^{235} ist ein gutes Beispiel für die Kompliziertheit dieser Strukturen. Die Energiewerte, für die eine starke Absorption stattfindet, bilden die *Energiestufen* des Kerns.

Die Untersuchung der Resonanzen oder Energiestufen von Kernen mittels des schnellen Unterbrechers bietet ein gutes Beispiel für die Zusammenhänge zwischen Grundlagenforschung, also der Untersuchung der Grundlagen der Materiestruktur, und der praktischen Anwendung. Der grundsätzliche Kernaufbau, also das Gesetz der Wechselwirkung zwischen Neutronen und Protonen, ist ein noch ungelöstes Problem der modernen Physik. Trotz der heute vorhandenen vielen Daten über Kerneigenschaften hat man über die Prinzipien des Kernaufbaues erst sehr unbestimmte Vorstellungen. Die Un-

tersuchungen der Neutronenresonanzen, also das Messen der Energiestufen, der Wirkungsquerschnitte und der Abhängigkeit dieser Größen von der Art des Kerns, liefern heute wertvolle Auskünfte, die für die Entwicklung von Theorien verwendet werden.

Obwohl die gemessenen Neutronenresonanzen für die Theorie unmittelbare Bedeutung haben und die Theoretiker vielleicht nur diese Bedeutung vor Augen haben, sind die Meßergebnisse auch für höchst praktische Dinge brauchbar. In erster Linie erfolgt die Anwendung beim Entwurf von Reaktoren; gegenwärtig sind das hauptsächlich große, für Kraftwerke bestimmte Leistungsreaktoren. Dabei ist die genaue Kenntnis der Resonanzstruktur so wichtiger Isotope wie U^{235}, ebenso die der Baumaterialien, wie Aluminium oder Stahl, und die der Kühlmittel, wie Wasser oder flüssige Metalle, von wesentlicher Bedeutung. Die Theorie ist nicht genügend fortgeschritten, um diese benötigten Stoffeigenschaften voraussagen zu können, sie müssen also einzeln gemessen werden. Wie ungemein wichtig die genaue Kenntnis der Resonanzeigenschaften im Reaktorbau ist, zeigt die Betrachtung der Stabilität von Reaktoren. Im Falle der Änderung der durchschnittlichen Neutronenenergie in einem Reaktor, z. B. durch einen plötzlichen Temperaturanstieg, können sich die Neutronen in eine starke Resonanz bewegen und die Intensität der Kettenreaktion könnte je nach den Eigenschaften dieser Resonanz schnell ab- oder zunehmen. Ist die Resonanz so beschaffen, daß mehr Spaltungen stattfinden, also eine plötzliche Zunahme der Intensität der Kettenreaktion erfolgt, so könnte das vielleicht gefährlich werden. Die andere Möglichkeit, die zu einer Abnahme der Intensität der Kettenreaktion führt, ist harmlos. Es ist offensichtlich wichtig zu wissen, welche dieser beiden Möglichkeiten eintreten kann.

Neutronenbeugung — das Studium der Kristallstruktur

Betrachten wir Reaktorneutronen, die etwas kleinere Energie haben als die zur Untersuchung der Neutronenresonanzen verwandten, so gelangen wir in einen Energiebereich, in dem

sich je Energieintervall viel mehr Reaktorneutronen aufhalten als bei jeder anderen Energie. Die Atome aller Stoffe sind in ständiger Bewegung, sie schwingen hin und her, ihre Energie stellt die Wärmeenergie des Stoffes dar. Die Energie der Neutronen verringert sich durch Zusammenstöße mit den Bremsmittelatomen des Reaktors und erreicht schließlich einen Wert, der ungefähr mit der Energie der Wärmeschwingungen übereinstimmt. Ein weiterer Energieverlust tritt im Mittel nicht ein, so daß in diesem *thermischen* Energiebereich die Neutronenintensität extrem groß ist; dies trifft natürlich nur für thermische Reaktoren, also Reaktoren mit einem Bremsmittel, zu.

Die Wellenlänge, der die Energie der am meisten vorkommenden Neutronen zukommt, ist glücklicherweise ungefähr gleich groß wie der Atomabstand in gewöhnlichen Stoffen, also etwa 10^{-8} Zentimeter. Wegen dieser Übereinstimmung eignen sich die Neutronen sehr gut zum Studium der Struktur von Stoffen, das heißt der geometrischen Anordnung der Atome in einzelnen Kristallen dieser Stoffe. Für Neutronen, deren Wellenlänge ungefähr mit den Atomabständen übereinstimmt, ist die Wechselwirkung oder der Wirkungsquerschnitt in ziemlich komplizierter Weise von der Neutronenenergie abhängig, wie Fig. 24 bei etwa 3 Å zeigt. Zusätzlich zum Wirkungsquerschnitt wird bei der Untersuchung der *Kristallstruktur* die Abhängigkeit der Anzahl der von der Stoffprobe gestreuten Neutronen vom Winkel zwischen der Richtung der einfallenden und der Richtung der gestreuten Neutronen gemessen. Die Abhängigkeit vom Winkel ist sehr kompliziert. Stellt man sie in Form einer Kurve dar, so hat diese steile Gipfel, die durch Überlagerung der an verschiedenen Kernen gestreuten Neutronenwellen entstehen. Diese Art der Streuung ist eine typische Welleneigenschaft, die man bei Lichtquellen als *Beugung* bezeichnet, entsprechend spricht man hier von *Neutronenbeugung*. Fig. 29 (Tafel) zeigt die für Beugungsexperimente benützten Einrichtungen, deren ziemlich großes Gewicht vor allem durch die notwendige gute Abschirmung bedingt ist.

Die bei der Beugung von Neutronen an festen kristallinen Stoffen entstehenden Intensitätsverteilungen entsprechen fast genau den bei der Beugung von Röntgenstrahlen entstehenden. Letztere benützt man schon viele Jahre zur Untersuchung

der Atomanordnung in Kristallen. Glücklicherweise werden Neutronen nicht in genau der gleichen Weise wie Röntgenstrahlen gestreut. So ist es möglich, die Neutronenbeugung dort mit großem Vorteil anzuwenden, wo die Röntgenstrahlenbeugung nicht geeignet ist.

Einen der wichtigsten Vorteile bietet die Neutronenbeugung bei der Untersuchung von Kristallen, die Wasserstoff enthalten. Wasserstoffatome enthalten jeweils nur ein Elektron, streuen also Röntgenstrahlen sehr wenig, so daß es sehr schwer ist, mit diesen die Anordnung von Wasserstoffatomen in Kristallen zu studieren. Die Streuung von Neutronen erfolgt nicht an den Elektronen eines Atoms, sondern an seinem Kern und hängt außer von der Kerngröße noch von vielen anderen Dingen ab, so daß Wasserstoff für Neutronen einen ziemlich großen Streuwirkungsquerschnitt hat, obgleich sein Kern nur ein Proton enthält. Während also Röntgenstrahlen durch Wasserstoffatome praktisch nicht beeinflußt werden, kann ihre Lage mit Neutronen gut untersucht werden. Die wasserstoffhaltigen Kristalle bilden eine außerordentlich wichtige Gruppe von Stoffen, denn zu ihnen gehören alle Kristalle *organischer Stoffe,* also der Stoffe, die z. B. das lebende Gewebe aufbauen und die hauptsächlich Wasserstoff-, Kohlenstoff- und Sauerstoffatome enthalten.

Ein anderer wichtiger Unterschied zwischen der Streuung von Neutronen und Röntgenstrahlen besteht darin, daß das Neutron ein *magnetisches Dipolmoment* hat, sich also ähnlich wie ein kleiner Magnet verhält und deshalb durch Magnetfelder gestreut wird. Tief im Innern fester Stoffe herrschende Magnetfelder können mit Neutronen untersucht werden, eine Aufgabe, die mit der gewöhnlichen Meßmethode nicht gelöst werden kann. Die Benützung von Röntgenstrahlen kommt nicht in Betracht, weil elektromagnetische Wellen durch magnetische Felder nicht gestreut werden. Neutronen bilden also ein wertvolles Werkzeug für die Untersuchung magnetischer Felder im Innern so wichtiger Stoffe wie z. B. Eisen, dessen magnetische Struktur äußerst kompliziert ist. Die üblichen Meßmethoden liefern nur Durchschnittswerte des im Innern herrschenden Feldes und ermöglichen nicht die sehr wichtige Bestimmung des um einzelne Atome herrschenden Magnetfeldes.

Die Reflexion von Neutronen an Spiegeln

Bei Neutronen mit großer Wellenlänge herrschen die Welleneigenschaften so vor, daß ihr Verhalten viel einfacher erklärt werden kann, wenn man sie als Lichtstrahlen und nicht als Strahl einzelner Teilchen betrachtet. Diese sehr langsamen Neutronen zeigen alle die uns — besonders im Zusammenhang mit Licht — vertrauten Welleneigenschaften. Der Teilchencharakter tritt kaum in Erscheinung. Zum Beispiel wird ein Strahl langsamer Neutronen beim Eintritt in Materie in der gleichen Art gebrochen wie ein Lichtstrahl beim Austritt aus Wasser in Luft. Ein Spiegel kann Neutronen in der gleichen Art wie Licht reflektieren, wegen der kleinen Wellenlänge der Neutronen müssen diese aber streifend auf die Spiegeloberfläche treffen. Neutronen, welche die Spiegeloberfläche unter einem größeren Winkel treffen, werden nicht reflektiert, sondern dringen ein.

Soll ein Material für langsame Neutronen durchlässig sein und andere optische Effekte ergeben, so darf es nur in geringem Maße Neutronen absorbieren. Obgleich die Neutronenabsorption der meisten Stoffe recht erheblich ist, gibt es doch einige, wie Kohlenstoff und Beryllium, welche die Neutronen hauptsächlich streuen und kaum absorbieren. Diese Stoffe eignen sich vorzüglich für Experimente, bei denen sehr langsame Neutronen durch große Stoffproben hindurchtreten müssen. Für Spiegel können auch Stoffe mit starker Absorption benützt werden, weil die Neutronen dabei nicht in den Stoff eindringen. Diese Art von optischen Experimenten benützt man zur Untersuchung der grundlegenden Wechselwirkungen zwischen den Elementarteilchen wie Neutronen, Protonen und Elektronen.

Eine sehr wichtige Wechselwirkung ist die zwischen Neutron und Proton, den Bausteinen der Kerne und damit aller Materie. Während sich die Kraft, die zwei elektrische Ladungen aufeinander ausüben, durch ein äußerst einfaches, wohlbekanntes Gesetz beschreiben läßt, ist die Kraftwirkung zwischen Neutron und Proton sehr viel komplizierter und keineswegs geklärt. Es ist also notwendig, die Kraft zwischen Neutron und Proton möglichst sorgfältig zu messen. Man braucht sie sowohl für praktische Berechnungen des Verhaltens der

Neutronen als auch für die Theorie der Kernkräfte. Die Messung dieser speziellen Wechselwirkung erfolgte durch die Reflexion eines schmalen Neutronenstrahles an der Oberfläche einer Flüssigkeit, die aus Kohlenwasserstoffverbindungen bestand. Das Verhältnis von Wasserstoff zu Kohlenstoff konnte verändert werden. Es zeigte sich, daß die Oberfläche einer ruhigen Flüssigkeit Neutronen sehr gut reflektiert, besser als ein hochpolierter Glas- oder Metallspiegel. Durch genaue Messung der sehr kleinen Winkel, bei denen für verschiedene Wasserstoff-Kohlenstoff-Verhältnisse eine Reflexion stattfand, konnte man die Stärke der Wechselwirkung zwischen Neutron und Proton sehr genau messen. Das Ergebnis ist sehr wichtig für Theorien, die erklären wollen, wie Neutronen und Protonen, die sich in einer gewissen Entfernung anziehen und in sehr großer Nähe abstoßen, in Kernen zusammengehalten werden.

Mit Hilfe der Reflexion von Neutronen wurde ferner die sich aus der elektrischen Anziehung zwischen Neutron und Elektron ergebende, wichtige Wechselwirkung gemessen. Auf den ersten Blick würde man annehmen, daß gar keine derartige Wechselwirkung vorhanden ist, denn das Neutron hat keine elektrische Ladung, und wie sollte daher zwischen Neutron und Elektron eine elektrische Kraft wirken. Eine eingehendere Untersuchung zeigt aber, daß zwischen dem Neutron und dem Elektron eine sehr kleine Kraft auftreten müßte, wenn das Elektron dem Neutron so nahe ist, daß es als in dessen innerer Struktur befindlich angesehen werden kann. Wir betrachten also die innere Struktur eines Teilchens, das als „elementar" gilt, was fast ein Widerspruch in der Bezeichnung ist. Man glaubte lange, daß Elementarteilchen keine Struktur haben, aber neuere Experimente machen deutlich, daß keines von ihnen einfach, strukturlos und elementar ist.

Entsprechend den gegenwärtigen Theorien der Kernkräfte besteht das Neutron aus einem Proton, das eng umgeben ist von einer *Mesonenwolke*. Die einzelnen Mesonen können positiv oder negativ sein, ihre Gesamtladung aber muß gleich einer Einheit der negativen Ladung sein, um die Ladung des Protons auszugleichen. In Kapitel 2 erfuhren wir bereits, daß die Mesonen zwischen den Kernbausteinen hin- und herfliegen und diese so mit großer Kraft zusammengehalten wer-

den. Kommt das Elektron dem Neutron so nahe, daß es sich in dessen Struktur, also zwischen Proton und Mesonenwolke befindet, so würde es natürlich von dem Proton elektrisch angezogen werden. Im Endeffekt würde aber die Anziehung sehr klein sein, weil die Wahrscheinlichkeit, daß ein Elektron in die räumlich sehr wenig ausgedehnte Struktur des Neutrons eintritt, gering ist. Nichtsdestoweniger ist die Messung dieses Neutron-Elektron-Effektes äußerst wichtig, weil seine tatsächliche zahlenmäßige Größe eine strenge Prüfung jeder Theorie der Mesonen und der Kernkräfte erlaubt.

Die Messung dieser Wechselwirkung erfolgte durch Reflexion eines Neutronenstrahls an der Grenzfläche zwischen Wismut und flüssigem Sauerstoff, wie es Fig. 30 zeigt. Das Wismut bis zur Grenzfläche durchdringen die Neutronen wegen ihrer großen Wellenlänge leicht. Da der Siedepunkt von flüssigem Sauerstoff bei einer Temperatur von 183° Celsius unter Null liegt, muß die Wismut-Sauerstoff-Kombination in einer Tiefkühlanlage untergebracht werden, die in der einfachen Zeichnung nicht gezeigt wird. Wegen der großen Zahl der Elektronen in Wismut, 83 um jeden Kern, und der kleinen Zahl in Sauerstoff, 16, kann der Einfluß der Elektronen auf die Streuung der Neutronen noch eindeutig nachgewiesen werden, wenn er nur 1 Prozent der Kernstreuung ausmacht, was man auf Grund der Mesonentheorie erwartet. Das Experiment zeigte, daß die Streuung viel geringer war als das vorausgesagte eine Prozent. Warum die Wechselwirkung zwi-

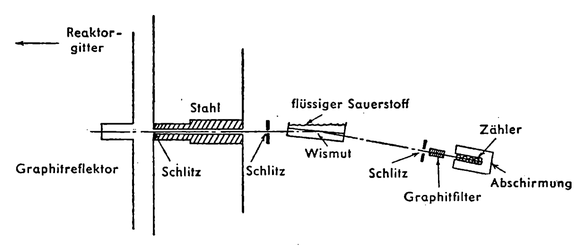


Fig. 30. Die Anordnung, die für die Reflexion der Neutronen an der Grenzfläche zwischen festem Wismut und flüssigem Sauerstoff benutzt wurde. Das Experiment diente der Messung der äußerst geringen Wechselwirkung zwischen Neutron und Elektron.

schen Neutron und Elektron viel geringer ist als man für die vorgeschlagene Neutronenstruktur erwartet, ist bis heute ungeklärt. Es ist gut möglich, daß die vorgeschlagene Struktur ein noch zu vereinfachtes Modell der wirklichen Verhältnisse ist, die eine fast verschwindende Neutronen-Elektronen-Wechselwirkung bedingen.

Diese Beispiele der mit Neutronen durchgeführten Grundlagenforschung zeigen, daß das wesentliche und unmittelbare Ziel dieser Experimente darin besteht, mehr über die grundlegenden Kräfte zwischen den „einfachsten" in jeder Materie vorkommenden Teilchen zu erfahren, den Neutronen, Protonen, Elektronen und Mesonen. Die praktische Anwendung dieser Entdeckungen wird bei der Planung und Durchführung der Experimente gewöhnlich nicht in Betracht gezogen. Es scheint aber, daß die Ergebnisse der Experimente früher oder später immer praktische Anwendungen finden. Ein sehr gutes Beispiel für eine sofortige Anwendung bietet die Untersuchung der Resonanzstruktur. Die Ergebnisse über magnetische Stoffe könnten später einmal zur Konstruktion besserer Magneten für industrielle Zwecke verwendet werden. Eine so grundsätzliche Angelegenheit wie die Wechselwirkung zwischen Neutron und Elektron wird in nächster Zukunft sicher keine praktische Anwendung finden. Man kann aber auch in diesem Fall gut einsehen, daß die Erkenntnisse über die Mesonenstruktur des Neutrons zu einer Verbesserung der Kerntheorie führen können. Eine verbesserte Theorie würde die sehr wertvolle Voraussage von Neutronenwirkungsquerschnitten ermöglichen, und zwar für im Reaktorbau benötigte Stoffe, deren Wirkungsquerschnitte noch nicht gut gemessen sind oder gar nicht gemessen werden können, weil die vorhandenen Stoffmengen für diese Experimente nicht ausreichen.

Die Verwendung von Neutronen für medizinische Heilverfahren

In diesem Kapitel betrachten wir nur die direkte Verwendung der Neutronen, ihren Gebrauch zur Gewinnung der Radioisotope behandeln wir im nächsten Kapitel. Unsere bisheri-

gen Beispiele beschränkten sich auf die Grundlagenforschung. Praktische Ergebnisse ergeben sich hierbei immer nur aus den gewonnenen Erkenntnissen, aber nicht unmittelbar durch den Gebrauch von Neutronen.

Jetzt wenden wir uns aber einem Beispiel zu, das eindrucksvoll zeigt, wie man mit Neutronen unmittelbar praktische Resultate erzielen kann. Es ist interessant, daß es nur wenige derartige Beispiele gibt, daß also der direkte Gebrauch von Neutronen bis heute im wesentlichen auf die Grundlagenforschung beschränkt ist. Unser Beispiel zeigt auch eindringlich, welche Möglichkeiten sich aus den heute verfügbaren, starken Neutronenstrahlen ergeben, Möglichkeiten, die es vor der Entdeckung der Kernkettenreaktion nicht gab.

Das Beispiel betrifft die Behandlung von Gehirnkrebs. Das Verfahren, das sich noch im Versuchsstadium befindet, wurde im Brookhaven National Laboratorium entwickelt und bisher bei einer Reihe von Patienten angewandt. Die Erfolge bei diesen Patienten und die zukünftigen Möglichkeiten sind so ermutigend, daß gegenwärtig im Brookhaven Laboratorium ein völlig neuer Reaktor gebaut wird, der hauptsächlich der Erforschung der Strahlenbehandlung von Gehirnkrebs dienen soll.

Die Radioaktivität wird schon seit über 50 Jahren zur Krebsbehandlung benützt. Die Behandlung beruht auf der Zerstörung von Krebszellen durch Strahlung, gleich, ob es sich um Alpha-, Beta- oder Gammastrahlung handelt. Natürlich muß dabei die Zerstörung des nahe liegenden gesunden Gewebes so weit wie möglich verhindert werden. Die ideale Art der Strahlung wäre die, welche nur das krebsbefallene Gewebe angreift. Bei der Art von Gehirnkrebs, die man mit Neutronen behandelt, absorbieren die Krebszellen aus dem Blutstrom schneller *Bor* als das gesunde Gewebe. Spritzt man also in das Blut eines Patienten, der an dieser Art von Gehirnkrebs leidet, eine Borlösung ein, so lagert sich in dem krebsbefallenen Gewebe das Bor schneller ab als in dem umliegenden gesunden Gewebe.

Bor hat für langsame Neutronen einen äußerst großen Absorptionswirkungsquerschnitt (aus diesem Grund wird es in Reaktorregelstäben verwendet), und der Borkern zerfällt nach Absorption eines Neutrons rasch durch Aussendung

eines Alphateilchens. Spritzt man also in die Blutbahn des Patienten eine Borlösung ein und bestrahlt anschließend dessen Kopf mit Neutronen, so werden diese durch die vorwiegend in dem Krebsgewebe befindlichen Borkerne absorbiert. Die beim Zerfall der Borkerne emittierte Alphastrahlung zerstört einen Teil der Krebszellen und nur in wesentlich geringerem Maße gesundes Gewebe. Für eine wirksame Behandlung ist ein sehr starker Neutronenstrahl erforderlich, was zu Schwierigkeiten führt. Es ist nämlich schwer, einen sehr starken Neutronenstrahl zu erzeugen, ohne gleichzeitig starke Gammastrahlung zu erhalten, die jeder Art von Gewebe schadet. Beim gegenwärtigen Entwicklungsstand der Behandlung empfängt jeder Patient eine sehr große Dosis Gammastrahlung. Technische Verbesserungen werden zweifellos einige der gegenwärtigen Schwierigkeiten verringern, aber für die nächste Zeit wird die Gammastrahlung die weite Verbreitung dieses Heilverfahrens ernstlich behindern.

Die derzeitige, beim Brookhaven-Forschungsreaktor zur Behandlung der Patienten verwendete Einrichtung zeigt Fig. 31. Bei dem zur Verfügung stehenden Graphitreaktor ist

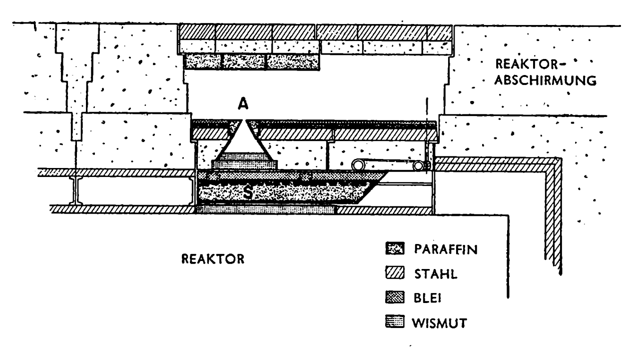


Fig. 31. Die Anordnung, die am Forschungsreaktor in Brookhaven für die Bestrahlung von Gehirntumoren mit Neutronen benutzt wird. Die Einrichtung befindet sich in einer Öffnung der oberen Abschirmung. Der Kopf des Patienten befindet sich an der Öffnung A, wo er bei geöffnetem Schieber S einer starken Neutronenstrahlung ausgesetzt ist. Die Gammastrahlung wird durch dicke, im Stahl angebrachte Wismutplatten verringert.

dies die bestmögliche Anordnung, und obwohl sie etwas primitiv ist, wurden mit ihr äußerst ermutigende Resultate erzielt. Der große Wismutblock absorbiert einen Teil der Gammastrahlung, die sonst dem Patienten ernstlich schaden würde. Wismut hat die nützliche Eigenschaft, Gammastrahlen sehr stark, Neutronen aber nur sehr wenig zu absorbieren, so daß es sehr geeignet ist, die in einem Reaktorneutronenstrahl stets enthaltene Gammastrahlung zu verringern.

Den neuen im Bau befindlichen Brookhaven-Reaktor für medizinische Forschung zeigt Fig. 32 (Tafel). Der ganze Reaktor wurde so geplant, daß der von ihm gelieferte Strahl thermischer Neutronen möglichst intensiv ist und wenig Gammastrahlung enthält. Die Zahl der je Zeiteinheit in den Kopf des Patienten eintretenden Neutronen wird etwa 25mal so groß sein als bei der in Fig. 31 gezeigten Anordnung, und die Stärke der Gammastrahlung sollte so gering sein, daß sie nicht schädlich ist. Ein Reaktor für ähnliche Behandlungen wird derzeit in Los Angeles gebaut, im Massachusetts Institute of Technology baut man einen Reaktor für medizinische und allgemeine Forschung.

Man muß jedoch nachdrücklich betonen, daß diese Behandlungsmethode vorläufig nur für eine spezielle Art des Gehirnkrebses angewandt wurde und noch nicht routinemäßig verwendet wird. Die bisher erzielten Erfolge lassen es aber wahrscheinlich erscheinen, daß diese neuen, auf der direkten Verwendung von Strahlung beruhenden Methoden schließlich fruchtbare Ergebnisse zeitigen werden.

Andere praktische Anwendungen der Reaktorstrahlung

Aus dem gegenwärtigen Kapitel geht hervor, daß die Neutronen für die Erforschung der inneren Materiestruktur ein äußerst wichtiges Werkzeug sind. Ihr Gebrauch für praktische Anwendungen ist dagegen bis jetzt etwas beschränkt, die Behandlung von Gehirnkrebs ist fast das einzige diesbezügliche Beispiel. Es sind ausgedehnte Untersuchungen im Gange, die ermitteln sollen, ob Reaktoren für andere praktische Bestrahlungszwecke gebraucht werden können, z. B. zur Ent-

keimung von Nahrungsmitteln oder zur Förderung bestimmter chemischer Reaktionen. Keine dieser Anwendungen ist so weit fortgeschritten oder hat so reale Erfolgsaussichten, daß in nächster Zeit praktische Programme aufgestellt werden könnten.

Schwierigkeiten bei der Anwendung von Reaktoren für diese Bestrahlungszwecke ergeben sich hauptsächlich aus der uneinheitlichen Natur der Strahlung in einem Reaktor: Gammastrahlung, Betastrahlung und Neutronen sind immer zusammen vorhanden. Aus diesem Grund kann z. B. die Gammastrahlung des Reaktors nicht zum Entkeimen von Nahrungsmitteln benützt werden, weil diese durch die Absorption der gleichzeitig auftretenden Neutronenstrahlung radioaktiv und damit unbrauchbar werden würden. Leider ist es äußerst schwierig, die verschiedenen Arten der Strahlung voneinander zu trennen, trotzdem können die gegenwärtigen Anstrengungen schließlich zum Erfolg führen. Eine mögliche Art des Vorgehens besteht darin, die Brennstoffelemente aus dem Reaktor herauszunehmen, nachdem dieser lange in Betrieb war, und sie neben den Nahrungsmitteln anzubringen, die keimfrei gemacht werden sollen. Unter diesen Bedingungen emittiert das Brennstoffelement Gammastrahlung, aber keine Neutronen. Die Stärke der Gammastrahlung ist allerdings viel geringer als in dem in Betrieb befindlichen Reaktor.

Es ist jedoch sicher, daß die direkte Verwendung von Neutronen innerhalb und außerhalb der Reaktoren für lange Zeit hauptsächlich der Erweiterung unserer Kenntnisse über die Struktur von Kernen, Atomen, Molekülen und Kristallen dienen wird. Diese Erkenntnisse der Grundlagenforschung werden viele praktische Anwendungsmöglichkeiten finden, das hat die Vergangenheit immer wieder bewiesen. Aber der mit den Neutronen erlangte Nutzen beschränkt sich nicht auf diese zukünftigen Ergebnisse. Die Verwendung der Neutronen in Reaktoren zur Erzeugung einer Unzahl von Radioisotopen stellt schon heute eine große Wohltat für die Menschheit dar. Wir wenden uns nun der Beschreibung der Herstellung dieser Radioisotope und einigen ihrer Anwendungen zu.

VI

RADIOISOTOPE

In Reaktoren werden ungeheure Mengen von Radioisotopen als Nebenprodukte erzeugt. Sie sind für die friedliche Anwendung äußerst geeignet und sind vielleicht das wichtigste Produkt des Atomzeitalters.

Aus: Isotopes – An Eight-Year Summary, Vol. 7 of Selected Reference Material on Atomic Energy. (United States Atomic Energy Commission, Aug. 1955)

Wir haben bereits in Kapitel II gesehen, daß die Kerne gewisser Atome instabil sind und ihre überschüssige Energie durch die Emission von Alpha-, Beta- oder Gammastrahlung abgeben. Fig. 6 zeigt, daß die instabilen Kerne, aus denen die *Radioisotope* aufgebaut sind, entweder zuviel oder zuwenig Neutronen enthalten. Durch Emission der für sie charakteristischen Strahlung gehen sie in Kerne über, in denen das Verhältnis von Neutronen zu Protonen ein stabiles ist. Von den in der Natur vorkommenden Elementen sind bis auf wenige Ausnahmen nur die schwersten, z. B. Radium, radioaktiv. Durch entsprechende Bestrahlung können heute Radioisotope aller chemischen Elemente hergestellt werden. Die Vielfalt dieser Radioisotope zeigen die leeren Kreise der Fig. 6.

Die Zahl der heute verfügbaren Radioisotope ist im Vergleich zu den wenigen, vor etwa 50 Jahren verfügbaren natürlichen Radioisotopen so groß, daß sich im Zusammenhang mit ihren Anwendungen ein eigenes Gebiet der Wissenschaft und Technik entwickelte. Ein großer Teil der für Wissenschaft und Industrie nützlichen Radioisotope findet sich unter den bei der Kernspaltung entstehenden mehreren hundert Arten radioaktiver Spaltbruchstücke. Außerdem bildet sich bei fast jeder Kernreaktion ein radioaktiver Kern. Wegen der großen Zahl von Kernreaktionen gibt es im allgemeinen verschiedene Methoden der Erzeugung eines bestimmten Radioisotops.

Obgleich der Gebrauch der Radioisotope der Menschheit vielleicht viel größeren Nutzen bringt als die Atomenergie selbst, ist die Schilderung dieses Nutzens doch viel schwieriger. Bei der Atomenergie handelt es sich um eine so augenfällige Sache wie die Erzeugung von Kilowatt, bei den Radioisotopen aber um eine Unzahl verschiedenster Anwendungen. Wir müssen uns deshalb auf die Auswahl typischer Beispiele beschränken. Diese gehören sehr verschiedenen Gebieten an, sie reichen von der reinsten Grundlagenforschung bis zu höchst praktischen Anwendungen, bei denen Radioisotope in Mengen gebraucht werden, welche die gesamte in der Welt benützte Radiummenge weit übertreffen.

Die Radioisotope stellen für Wissenschaft und Technik ein völlig neues Werkzeug dar, dessen Grundlagen einfach zu beschreiben sind. Wir wollen sie im übernächsten Abschnitt untersuchen. Radioisotope können als Leitisotope in äußerst kleinen Mengen zur Erforschung der Struktur und des Verhaltens von Stoffen bei physikalischen, chemischen, biologischen und industriellen Vorgängen verwendet werden. Große Mengen von Radioisotopen werden benützt, wenn man Stoffe merklich verändern, z. B. krebsbefallenes Gewebe zerstören, Nahrungsmittel sterilisieren oder technisch wichtige Materialeigenschaften verbessern will.

Die Gewinnung von Radioisotopen

Wie wir gesehen haben, entstehen bei fast jeder Kernreaktion instabile Kerne, also Radioisotope. Obgleich seit den dreißiger Jahren viele Kernreaktionen bekannt sind, konnten große Mengen von Radioisotopen erst nach dem Bau von Kernreaktoren gewonnen werden. Die in diesen herrschende große Neutronenintensität erlaubt die Herstellung von Radioisotopen in Mengen, die mehrere tausendmal so groß sind als die mit dem Teilchenstrahl eines Beschleunigers, z. B. eines Zyklotrons, herstellbaren.

Die Erzeugung von Radioisotopen in einem Reaktor beruht auf dem Einfang von Neutronen durch das jeweilige chemische Element, das in seiner normalen, stabilen Form in den Reaktor

eingeführt wird. Soll also z. B. das Radioisotop Natrium-24 (das Symbol ist Na^{24}) hergestellt werden, so führt man gewöhnliches, stabiles Natrium (Na^{23}) in den Reaktor ein, und zwar üblicherweise als Pulver in einem geeigneten Behälter. Da die Handhabung von reinem Natrium gefährlich ist, wird es gewöhnlich in Form einer stabilen chemischen Verbindung, z. B. Kochsalz, NaCl, bestrahlt. Bei der Bestrahlung mit Neutronen im Inneren des Reaktors absorbiert ein Teil der Natriumkerne Neutronen, und aus jedem dieser Na^{23}-Kerne entsteht so ein radioaktiver Na^{24}-Kern. Die Zahl der nach einer gewissen Bestrahlungsdauer in der Na^{23}-Probe vorhandenen Na^{24}-Kerne wird natürlich davon abhängig sein, wie schnell ein erzeugter Na^{24}-Kern wieder zerfällt.

Die Geschwindigkeit des Zerfalls von Radioisotopen ist von großer Bedeutung. $_{11}Na^{24}$ zerfällt unter Emission eines Betateilchens in $_{12}Mg^{24}$ (Magnesium), dieses hat die gleiche Massenzahl, aber eine um 1 größere Kernladung als Na^{24}. Nimmt die Zahl der in der Probe vorhandenen Na^{24}-Kerne zu, so zerfallen je Zeiteinheit auch mehr Na^{24}-Kerne in Mg^{24}-Kerne; die Wahrscheinlichkeit, daß ein Na^{24}-Kern zerfällt, ist unabhängig von der Gegenwart anderer Na^{24}-Kerne; nimmt also die Gesamtzahl der vorhandenen Na^{24}-Kerne zu, so nimmt auch die Zahl der je Zeiteinheit zerfallenden zu. Es muß also einmal ein Zustand eintreten, bei dem die Zahl der je Zeiteinheit zerfallenden Na^{24}-Kerne gerade gleich der Zahl der je Zeiteinheit durch Neutroneneinfang erzeugten wird. Von diesem Zeitpunkt an kann sich die Menge des in der Na^{23}-Probe vorhandenen Na^{24} nicht mehr ändern. Trotz Fortsetzung der Bestrahlung ergibt sich keine weitere Zunahme. Dieser Zustand wird als *Sättigung* bezeichnet, er stellt ein dynamisches Gleichgewicht zwischen dem Zerfall und der Bildung des Radioisotops dar. Wie die Na^{24}-Menge mit der Bestrahlungsdauer zunimmt, zeigt Fig. 33. Nach 40 Stunden erfolgt die Na^{24}-Zunahme schon sehr langsam. Eine wichtige Schlußfolgerung unserer Betrachtungen ist, daß die bei der Sättigung vorhandene Menge des Radioisotops um so größer ist, je größer die benützte Neutronenintensität ist, denn mit dieser nimmt die Zahl der je Zeiteinheit gebildeten Na^{24}-Kerne und entsprechend auch die Zahl der zerfallenden zu; zerfallen aber

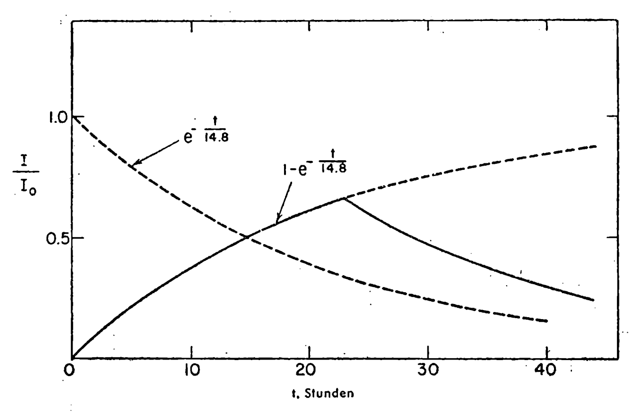


Fig. 33. Die Zunahme der Aktivität eines Radioisotops, hier Na^{24} mit 14,8 Stunden Halbwertszeit, mit der Bestrahlungsdauer. Senkrecht ist das Verhältnis der Aktivität I zur Sättigungsaktivität I_0 aufgetragen. Die Kurve, die bei eins beginnt, gibt den Abfall der Aktivität eines Radioisotops, das die Sättigungsaktivität erreicht hat, nach der Entfernung aus dem Reaktor wieder. Der Abfall, der eintritt, wenn die Bestrahlung beendet wird, bevor die Sättigungsaktivität erreicht wurde, ist auch gezeigt. Die angegebenen mathematischen Ausdrücke geben den exponentiellen Anstieg und Abfall der Aktivität wieder.

je Zeiteinheit mehr Na^{24}-Kerne, so muß auch mehr Na^{24} vorhanden sein.

Entfernt man den bestrahlten Stoff aus dem Reaktor, z. B. nach dem Erreichen der Sättigung, so nimmt die Zahl der in ihm enthaltenen radioaktiven Atome, in unserem Fall sind es Na^{24}-Atome, ständig ab. Weil die Wahrscheinlichkeit, daß ein Atom zerfällt, von der Gegenwart anderer Atome unabhängig ist, muß, wenn die Zahl der insgesamt vorhandenen Na^{24}-Atome abnimmt, auch die Zahl der je Zeiteinheit zerfallenden Na^{24}-Atome, d. h. die *Aktivität* des Radioisotops, abnehmen. Die Menge und die Aktivität eines bestimmten Radioisotops nehmen stets *exponentiell* ab, Fig. 33 zeigt dies für Na^{24}. Man sieht, daß die Kurve, welche die Zunahme der Aktivität während der Bestrahlung darstellt, sich durch einfache Spiegelung der Zerfallskurve ergibt.

Die Geschwindigkeit, mit der ein bestimmtes Radioisotop zerfällt, ist eine charakteristische Eigenschaft desselben. Ein Radioisotop zerfällt um so schneller, je instabiler es ist, je größer also die Energie der beim Zerfall emittierten Strahlung ist. Die Zerfallsgeschwindigkeit oder die Instabilität des Radioisotops läßt sich durch seine *Halbwertszeit* ausdrücken, das ist die Zeit, innerhalb der die Hälfte der anfänglich vorhandenen Atome zerfallen ist; sie beträgt z. B. für Na^{24} 14,8 Stunden. Der Begriff der Halbwertszeit zeigt deutlich, auf welche Weise die Aktivität eines Radioisotops mit der Zeit abnimmt: nach der ersten Halbwertszeit existieren noch 50 Prozent der anfänglich vorhandenen Atome, nach der zweiten Halbwertszeit 25 Prozent, dann 12,5 Prozent, 6,25 Prozent usw. Man sieht also, daß die Aktivität eines Radioisotops in der gleichen Weise abnimmt wie die Zahl der insgesamt vorhandenen Atome, denn diese beiden Größen sind einander proportional. Die Halbwertszeit, ein Maß für die Stabilität eines Radioisotops, ist für jedes Radioisotop verschieden. Die Halbwertszeiten erstrecken sich von weniger als einer millionstel Sekunde bis zu mehr als einer Milliarde Jahren, beide Extreme entziehen sich unseren Meßmethoden. Zwischen diesen Extremen liegen Halbwertszeiten von Sekunden, Stunden, Tagen, Monaten und Jahren; dieser ungeheuer große Bereich erweist sich bei der Auswahl von Radioisotopen für bestimmte Zwecke als äußerst vorteilhaft.

Mit Reaktoren können glücklicherweise fast alle nützlichen Radioisotope erzeugt werden, und zwar so große Mengen, daß der stetig zunehmende Bedarf leicht gedeckt werden kann. Die der Erzeugung von Radioisotopen in Reaktoren zugrunde liegende Kernreaktion ist der Einfang von Neutronen, wie wir es bei der Na^{24}-Herstellung beschrieben haben. Nur in sehr wenigen Fällen werden andere Reaktionen, wie z. B. die „(n,p)-Reaktion", also der Einfang eines Neutrons und die Emission eines Protons, zur Herstellung von Radioisotopen benützt. Diese Reaktionen erfordern aber gewöhnlich sehr schnelle Neutronen, und man führt sie deshalb oft viel besser mit Teilchenbeschleunigern durch.

Es ist möglich, von den im Reaktor entstehenden radioaktiven Spaltbruchstücken bestimmte Radioisotope abzu-

trennen. Dazu entfernt man die Uran-Brennelemente aus dem Reaktor und trennt dann das gewünschte Radioisotop mit chemischen Methoden von der Menge der übrigen Spaltbruchstücke und dem Uran ab. Dieses Verfahren eignet sich offensichtlich nicht für Spaltbruchstücke kurzer Halbwertszeit, weil diese so schnell zerfallen, daß sie schon während der Entfernung der Brennstoffelemente und der chemischen Abtrennung praktisch vollständig zerfallen wären. In bestimmten wichtigen Fällen ist es aber gelungen, Spaltbruchstücke mit nur wenigen Minuten Halbwertszeit chemisch abzutrennen. Weil die chemische Abtrennung in Gegenwart so vieler Elemente, wie sie die Spaltbruchstücke darstellen, ziemlich kompliziert ist, spielt diese Art der Isotopenerzeugung nicht die Rolle wie die auf dem Neutroneneinfang im Reaktor beruhende.

Im Oak Ridge-Reaktor wird eine große Zahl von Radioisotopen hergestellt, die für die verschiedensten Zwecke in die ganze Welt verschickt werden. Um einen Eindruck über die Größe dieses Programms zu vermitteln, sei angegeben, daß die Isotopenabteilung der Atomenergiekommission im ganzen über 80 000 Sendungen mit im Oak Ridge-Reaktor hergestellten Radioisotopen in die ganze Welt verschickt hat, dabei waren weniger als 10 000 für Einrichtungen der Atomenergiekommission bestimmt. Weil es nicht möglich ist, nur durch Zahlenmaterial die wahre Bedeutung der Radioisotope für praktisch alle Zweige der Wissenschaft zu zeigen, wollen wir uns fast das ganze Kapitel hindurch mit einigen wichtigen Anwendungen der Radioisotope beschäftigen. Wir werden z. B. sehen, warum allein 30 000 der erwähnten Sendungen auf Radiojod, J^{131}, treffen.

Die Vielzahl und die erforderlichen Mengen an Radioisotopen lassen erwarten, daß mit ihrer Herstellung viele Probleme verbunden sind. Eine dieser Schwierigkeiten sollte uns nach dem bisher Gelernten sofort ersichtlich sein: die Möglichkeit einer zu starken Neutronenabsorption durch die in den Reaktor eingeführten Stoffe und damit die Verhinderung der Kettenreaktion. Dieser unerwünschte Sachverhalt kann auch so ausgedrückt werden: Bei der Herstellung von Radioisotopen ist es möglich, daß die *Überschußempfindlichkeit* des Reaktors vollständig verschwindet und der *Vermehrungs-*

faktor unter 1 sinkt. Glücklicherweise nimmt aber die Zahl der verfügbaren Reaktoren ständig zu, so daß der immer größere Bedarf an Radioisotopen trotzdem befriedigt werden kann.

Dieser Bedarf würde schon durch die bloße Aufzählung der Gebiete, in denen man Radioisotope verwendet, eindrucksvoll bewiesen werden. Es dürfte aber besser sein, Beispiele aus den Hauptanwendungsbereichen der Radioisotope zu betrachten.

Gekennzeichnete Atome — Radioisotope als Leitisotope

Würden die Radioisotope im Sinne all der Betrachtungen verwendet werden, die innerhalb der letzten Jahre in der Presse angestellt wurden, so würden sie unser ganzes Leben revolutionieren. Unsere Wohnungen würden mit kleinen Öfen, die mit Spaltbruchstücken gefüllt sind, geheizt werden. Wir könnten auf unsere Kühlschränke verzichten, weil die Nahrungsmittel leicht und billig durch Strahlung entkeimt werden könnten, und die meisten Krankheiten würden von der Erde verschwinden, weil man ihre Erreger auch mit Strahlung vernichten würde. Wie bei der Atomenergie, so sind auch hier die nüchternen Tatsachen sehr verschieden von zügellosen Vermutungen. Wahr ist, daß die Radioisotope im Laufe der Zeit noch viele bedeutsame Anwendungen finden werden. Wie bei der Atomenergie in Kapitel IV wollen wir uns auch hier vorwiegend mit bereits bewiesenen Dingen beschäftigen und nicht mit unsicheren, in der Zukunft liegenden Möglichkeiten.

Während die Grundlagenforschung im allgemeinen sehr kleine Mengen von Radioisotopen braucht, erfordern die praktischen Anwendungen der Radioisotope bedeutend größere Mengen; diese sind oft so groß, daß sie absolut tödlich wirken, wenn nicht sorgfältige Sicherheitsvorkehrungen getroffen werden. Unsere weitere Behandlung trägt der Entwicklung von der Grundlagenforschung zu praktischen Anwendungen Rechnung. Wir untersuchen als erstes die Verwendung der Radioisotope als *Leitisotope*. Bei weitem am meisten werden die Radioisotope gegenwärtig in der Forschung verwendet,

und als Leitisotope liefern sie dort Erkenntnisse, die man mit den früheren Methoden nur mit großen Schwierigkeiten oder gar nicht gewinnen kann.

Radioaktive Isotope können als Leitisotope verwendet werden, weil sie eine energiereiche, leicht nachweisbare Strahlung emittieren. Die Energie dieser Strahlung ist sehr oft von der Größenordnung einer Million Elektronenvolt, sie leitet sich, entsprechend der Einsteinschen Gleichung, aus der im Vergleich zum stabilen Isotop größeren Masse des radioaktiven Isotops ab. Zwischen der Halbwertszeit des Radioisotops und der Energie der von ihm emittierten Strahlung besteht ein grober Zusammenhang: je größer die Energie, um so größer die Zerfallsgeschwindigkeit und um so kleiner die Halbwertszeit. Während die radioaktiven Isotope sehr schwerer Kerne oft Alphateilchen emittieren, handelt es sich bei den meisten übrigen Radioisotopen um Beta- und Gammastrahlung. Wir wiederholen: Alphateilchen sind Heliumkerne, Betateilchen sind Elektronen hoher Geschwindigkeit, Gammastrahlung besteht aus elektromagnetischen Wellen sehr kleiner Wellenlänge, besitzt also keine Masse. Beim Zurücklegen der gleichen Wegstrecke in Materie verlieren Alpha- und Betateilchen viel mehr Energie als Gammastrahlen. Anhaltspunkte für die Dicke, die verschiedene Stoffe haben müssen, um die einzelnen Strahlenarten aufhalten zu können, gibt Fig. 7. Gammastrahlen können also z. B. durch den ganzen menschlichen Körper hindurchtreten, ohne daß sie wesentlich geschwächt werden.

Wegen der Durchdringungskraft der von ihnen emittierten Strahlung können Radioisotope so vorteilhaft als Leitisotope gebraucht werden. Sogar ein Radioisotop, das sich im Innern eines festen Körpers befindet, kann durch den außerhalb des Körpers erfolgenden Nachweis der emittierten Strahlung festgestellt werden. Hierbei zeigt sich auch die Bedeutung des Wortes „Leitisotop"; denn mischen wir einige radioaktive Atome mit stabilen Atomen des gleichen Elementes, fügen wir also dem stabilen Isotop ein radioaktives Isotop bei, so wird uns die von dem radioaktiven Isotop emittierte Strahlung stets dorthin „leiten", wo sich das Element im Verlaufe irgendeines Vorganges gerade befindet. Trotz der emittierten, durchdringenden Strahlung können die großen Möglichkeiten der

Radioisotope nur dann ausgenützt werden, wenn winzige Mengen der Radioisotope leicht nachgewiesen werden können. Glücklicherweise ermöglichen die große Energie der Strahlung und die extreme Empfindlichkeit moderner Nachweisgeräte sogar den Nachweis der Strahlung, die beim Zerfall eines einzigen radioaktiven Kerns emittiert wird.

Nachweis von Leitisotopen

Es bedarf nur eines kurzen Vergleichs mit den übrigen Methoden, um die sehr große Leistungsfähigkeit der Radioisotope anschaulich zu machen. So erfordert z. B. die übliche, im Laufe vieler Jahre hochentwickelte chemische Analyse Stoffmengen, die noch eine ungeheuere Zahl von Atomen enthalten. Mit äußerst empfindlichen chemischen Methoden kann man in einigen Fällen noch ein billionstel Gramm eines Stoffes nachweisen, aber selbst in dieser kleinen Menge sind z. B. bei Natrium noch 26 Milliarden Atome enthalten. Handelt es sich dagegen um radioaktives Natrium, so reichen einige Atome aus, um mit einem modernen Zählrohr die emittierte Strahlung nachweisen zu können.

Wir wollen den Strahlungs-Nachweisgeräten etwas mehr Zeit widmen, denn die Verwendungsmöglichkeiten der Radioisotope wären ohne diese hochempfindlichen Instrumente sehr eingeschränkt. Nur sie ermöglichen es, Untersuchungen mit so kleinen Mengen von Radioisotopen durchzuführen, daß die Strahlung die zu untersuchenden Vorgänge nicht beeinflußt. Radioisotope können so z. B. in lebendem Gewebe verwendet werden, ohne dieses zu schädigen; das wäre natürlich kaum möglich, wenn man Milliarden von Atomen verwenden müßte, wie es für den chemischen Nachweis notwendig ist. Viele heute erfolgreich durchgeführte Versuche wären dann nicht möglich.

Das Nachweisinstrument, das die Möglichkeit der Radioisotope so ungeheuer erweiterte, ist das wohlbekannte Geiger-Müller-Zählrohr. Der Name wird heute fast allgemein, vielleicht unfair gegenüber Herrn Müller, in „Geiger-Zählrohr" abgekürzt. Bei dem in Fig. 34 dargestellten *Geigerzählrohr*

handelt es sich um ein ziemlich einfaches Instrument. Wie bei vielen Geräten der Physik verbergen sich auch hier hinter der Einfachheit höchst verwickelte Erscheinungen, in diesem Fall sind es die unvollständig geklärten Eigenschaften elektrischer Gasentladungen. Das Zählrohr besteht gewöhnlich aus einem Zylinder, längs dessen Achse ein Draht angebracht ist und der mit einem Gas, meistens Argon, gefüllt ist. Zwischen Draht und Zylinder wird eine elektrische Spannung angelegt, die so hoch, gewöhnlich etwa 1000 Volt, gewählt wird, daß sie nur wenig kleiner ist als die Spannung, bei der zwischen Draht und Zylinder ein elektrischer Funke überschlagen, also eine elektrische Entladung stattfinden würde.

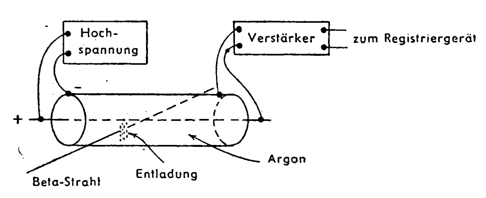


Fig. 34. Das Prinzip der Wirkungsweise eines Geiger-Müller-Zählrohres. Ein Betateilchen, das auf das Zählrohr trifft und in dessen Gasfüllung eindringt, erzeugt in dem Gas Elektronen und positiv geladene Gasatome, die eine elektrische Entladung verursachen. Der so entstehende elektrische Impuls wird verstärkt und dann registriert.

Unter der Voraussetzung, daß in das Innere des Geigerzählrohrs keine Strahlung eintritt, findet in dem elektrisch neutralen Argongas bei der gewählten Spannung keinerlei elektrische Entladung statt, das Geigerzählrohr befindet sich in Ruhe. Die Situation ändert sich aber schlagartig, wenn in der Umgebung des Geigerzählers ein radioaktives Atom zerfällt und die von ihm emittierte Strahlung, zum Beispiel Betastrahlung, in das mit Argon gefüllte Geigerzählrohr eintritt. Die Betastrahlen haben die Eigenschaft, beim Durchgang durch Materie einem Teil der Atome eines oder mehrere der äußeren Elektronen zu entreißen. Es entsteht also negative Ladung in Form der so abgetrennten Elektronen und positive elektrische Ladung in Form der betroffenen Atome, die, weil sie zu wenig Elektronen haben, nun einen Überschuß an positiver

Ladung haben. In dem Argongas unseres Geigerzählrohrs werden also beim Durchgang der Strahlung negativ geladene Elektronen und positiv geladene Argonatome erzeugt, erstere bewegen sich unter dem Einfluß der Spannung schnell gegen den Draht, letztere gegen den Zylinder, wegen ihrer großen Masse allerdings bedeutend langsamer. Die auf ihrem Weg zum Draht stark beschleunigten Elektronen entreißen weiteren Argonatomen Elektronen, so daß die Größe der im Argongas freigesetzten elektrischen Ladung sehr schnell zunimmt. Wir versuchen hier nicht diesen Prozeß zu beschreiben, denn er ist nicht nur verwickelt, sondern auch, trotz vieler Untersuchungen, noch nicht ganz geklärt.

Obwohl wir die Eigenheiten der Ladungsvermehrung überspringen, sehen wir leicht ein, daß die vorhandene freie elektrische Ladung bald so groß ist, daß zwischen Draht und Zylinder eine elektrische Entladung eintritt. Ist die Entladung erst einmal eingetreten, so ist der weitere Nachweis nicht mehr schwierig, das durch sie gelieferte elektrische Signal, „Impuls" genannt, muß nur noch mit elektrischen Mitteln verstärkt werden. Der Stromimpuls läuft entlang dem Draht und wird als Eingangsimpuls einer Elektronenröhre zugeführt, die von der gleichen Art ist wie die in Rundfunk- und Fernsehempfängern verwendeten. Die dann erfolgende Verstärkung des Impulses gleicht der von Radiowellen in einem Rundfunkempfänger. Der verstärkte Impuls kann ein hörbares Knacken hervorrufen oder eine Signallampe zum Aufleuchten bringen, so daß eine direkte Anzeige des in das Geigerzählrohr eingedrungenen Beta- oder Gammastrahls stattfindet. Bei den meisten Experimenten ist die Zahl der auf das Geigerzählrohr treffenden Strahlen so groß, daß ihre Zählung ein elektronisches Zählgerät erfordert, das die ankommenden elektrischen Impulse zählt und das Ergebnis mit einem System von Lampen anzeigt oder es auf einen fortlaufenden Papierstreifen druckt.

Will man schnell aufeinanderfolgende Strahlen zählen, so muß die durch einen Strahl ausgelöste elektrische Entladung möglichst schnell gelöscht werden, so daß bereits der nächste Strahl wieder eine neue Entladung auslösen kann. Das Löschen der Entladung erreicht man durch eine schnelle Verkleinerung

der am Zählrohr liegenden Spannung oder indem man dem Füllgas bestimmte Dämpfe zusetzt. Auf diese Weise kann man mit einem Geigerzählrohr Hunderte von Strahlen je Sekunde nachweisen, so daß die schnelle Aufeinanderfolge der Strahlen für den Geigerzähler im allgemeinen kein Problem bildet.

Obgleich der Geigerzähler bei dem Gebrauch der Radioisotope das hauptsächliche Nachweisinstrument ist, gibt es auch andere Instrumente, die in mancher Beziehung noch stabiler und empfindlicher sind. Das Proportionalzählrohr besitzt die gleiche Konstruktion wie das Geigerzählrohr, aber die angelegte Spannung liegt wesentlich unter dem Wert, bei dem ein Funke überschlagen würde, deshalb ist die durch die Strahlung ausgelöste elektrische Entladung bedeutend schwächer. Der entstehende elektrische Impuls ist viel kleiner, muß also viel mehr verstärkt werden. Außerdem ist die Dauer des Impulses viel kürzer, so daß mit diesem Zählrohr Strahlen mit noch schnellerer Aufeinanderfolge registriert werden können, als es mit dem Geigerzählrohr möglich ist; allerdings ist das nur in wenigen Fällen nötig. Der Ausdruck „proportional" soll darauf hinweisen, daß die Größe des entstehenden elektrischen Impulses proportional der Anzahl der von der Strahlung in dem Zählrohr primär gebildeten Elektronen ist. Dieser Zusammenhang ermöglicht Aussagen über die Energie der betreffenden Strahlung; mit dem Geigerzählrohr ist das nicht möglich, weil die elektrische Entladung so verläuft, daß alle Impulse, unabhängig von der Anzahl der primär freigesetzten Elektronen, gleich groß werden.

Ein noch schnelleres und in mancher Hinsicht einfacheres Nachweisinstrument, das im Begriff ist, allgemeine Verwendung zu finden, ist der *Szintillationszähler*. Bei diesem benützt man Kristalle, z. B. einen Lithiumjodidkristall, welche die Eigenschaft haben, beim Durchgang von Strahlung, z. B. von Beta- oder Gammastrahlung, sehr schwache Lichtblitze zu emittieren. Der Nachweis der Lichtblitze erfolgt mit einem *Photovervielfacher,* das ist ein Gerät, das die sehr kleinen Lichtimpulse in sehr kleine Stromimpulse umwandelt und diese anschließend in großem Maße verstärkt; äußerlich gleicht der Photovervielfacher einer Radioröhre, nur ist er etwas größer. Der Licht-

blitz, dessen Entstehungsgeschichte im Kristall noch keineswegs völlig geklärt ist, ist von so kurzer Dauer, daß der Szintillationszähler bei weitem der schnellste Zähler ist. Außerdem hat er wie das Proportionalzählrohr den Vorteil, daß der entstehende Impuls proportional der im Zähler, hier also der im Kristall, absorbierten Strahlungsenergie ist.

Um die Bedeutung der Nachweisinstrumente nicht zu übertreiben, sei darauf hingewiesen, daß die beiden letzten Arten für den mannigfachen Gebrauch der Radioisotope nicht unbedingt notwendig sind. Das einfache, schon seit vielen Jahren verwendete Geigerzählrohr kann praktisch für alle Arbeiten benützt werden, auch wenn es manchmal etwas weniger geeignet und zeitraubend ist. Was wir betonen wollen, ist, daß die großen Möglichkeiten und die Schönheit der Experimente mit Leitisotopen nicht so sehr durch die Leistungsfähigkeit der Instrumente, als vielmehr durch die sehr günstige Eigenschaft der Radioisotope, ihre Gegenwart deutlich zu machen, bedingt sind. Gerade die Einfachheit und die im Rahmen der modernen Forschung geringen Kosten der benötigten Einrichtung machen die Experimente mit Radioisotopen so schön; dies ist auch ein wesentlicher Grund für die ungeheuer schnelle Zunahme ihrer Verwendung. Diese Experimente können auch an kleinen Universitäten durchgeführt werden, die sich die für viele andere Arten der Forschung erforderlichen kostspieligen Einrichtungen nicht leisten können. Weil nur ein einfacher Geigerzähler und geringe Mengen Radioisotope notwendig sind, können auch in Krankenhäusern Versuche angestellt werden, die ihren kleinen Teil zu dem gesamten Wissen beitragen, das mit Radioisotopen gewonnen wird, und das heute auf vielen Gebieten den Fortschritt der Wissenschaft beschleunigt.

Bevor wir uns einzelnen Experimenten mit Leitisotopen zuwenden, wollen wir die allgemeinen Grundlagen betrachten. Weil wir schon früher radioaktives Natrium erwähnten, wollen wir uns jetzt einen Versuch vorstellen, der zeigt, wie sich das Element Natrium im Verlaufe irgendeines Prozesses verhält. Bringt man gewöhnliches Natrium, das aus Na^{23}-Atomen besteht, in einen Reaktor, so wird ein kleiner Bruchteil der Na^{23}-Atome durch Neutroneneinfang in Na^{24}-Atome

verwandelt. Die Halbwertszeit von Na^{24} beträgt etwa 15 Stunden, ist also ziemlich kurz; der Experimentator wird sich deshalb höchstwahrscheinlich das radioaktive Natrium nicht aus Oak Ridge schicken lassen, sondern in der Nähe eines Reaktors arbeiten, um es bereits kurze Zeit nach der Herstellung verwenden zu können.

Er wird dann das Natrium dem Stoff hinzufügen, den er untersuchen will; wegen der allgemein gehaltenen Betrachtung nennen wir ihn einfach X. Wäre der Stoff X ein Tier, so würde er das Natrium wahrscheinlich dem Futter hinzufügen oder es in die Blutbahn einspritzen. Nähme X an einer chemischen Reaktion teil, so würde er das Natrium einfach den Chemikalien beimengen, genauso wie er es den Rohmaterialien hinzufügen würde, wenn er die Einwirkung von Natrium auf die Stahlherstellung untersuchen wollte. Zum Nachweis des Natriums bringt man in der Nähe von X, ganz gleich, um was es sich handelt, ein Geigerzählrohr an, so wie es Fig. 35 zeigt.

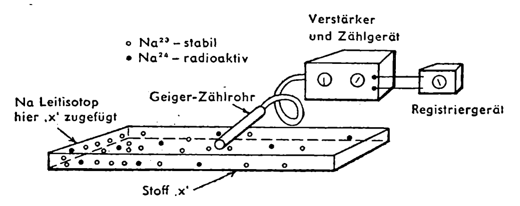


Fig. 35. Das Prinzip der Verwendung von Leitisotopen. Die Verteilung des Leitisotops in dem Stoff X kann wegen der emittierten Strahlung mit einem Geigerzählrohr festgestellt werden, ohne daß der Stoff X beeinflußt wird.

Die Zahl der je Zeiteinheit registrierten Impulse, die *Zählrate*, ist ein Maß für die in der Nähe des Zählrohrs befindliche Natriummenge. Durch Bewegen des Zählrohrs kann man also die Verteilung von Natrium in X finden, ohne X zu beeinflussen. Durch Berücksichtigung der Abhängigkeit von der Zeit läßt sich feststellen, wie sich das Natrium durch den Stoff bewegt und was es schließlich für ein Schicksal erleidet. Obgleich das radioaktive Natrium in einer viel größeren

Menge stabilen Natriums verteilt ist, zeigt es doch die Verteilung und das Verhalten des gesamten Natriums an — es wirkt als *Leitisotop*. Die Methode der Leitisotope ist nur möglich, weil das radioaktive Na^{24} und das stabile oder „normale" Na^{23} sich bei allen chemischen Prozessen und auch bei allen physikalischen Vorgängen, soweit diese nicht den Atomkern betreffen, und nur um solche handelt es sich hier, gleich verhalten. Bei bestimmten Experimenten werden recht ausgeklügelte Methoden angewandt, um dem Leitisotop hinsichtlich Ort und Zeit auf der Spur zu bleiben. Stets gilt aber der einfache Sachverhalt, daß die Zahl der je Zeiteinheit gezählten Impulse, die Zählrate, ein Maß darstellt für die Menge des Leitisotops und damit auch des zu untersuchenden Stoffes, die in unmittelbarer Nähe des Zählrohrs vorhanden ist.

Natürlich ergeben sich gewisse Schwierigkeiten, z. B. muß die Strahlung des Radioisotops unterschieden werden von einer praktisch immer vorhandenen Strahlung der Umgebung, dem sogenannten *Hintergrund;* dieser liefert je Zeiteinheit eine bestimmte Zahl von Impulsen, den *Nulleffekt*. Oft bietet die für jedes Radioisotop charakteristische zeitliche Abnahme der Zählrate ein wertvolles Hilfsmittel für seinen Nachweis. Wir sprachen auch unbeschwert von dem „Hinzufügen" des Natriums oder anderer Radioisotope zu dem Stoff X, aber der Einbau eines Radioisotops in eine komplizierte chemische Verbindung, z. B. in solche, die das lebende Gewebe aufbauen, bildet in vielen Fällen eine äußerst schwierige Aufgabe. Diese Schwierigkeiten sind aber nicht unüberwindbar, und die anschließend behandelten Beispiele werden uns zeigen, wie der Gebrauch von Leitisotopen trotz vieler praktischer Schwierigkeiten auf nahezu allen Gebieten der Forschung bedeutsame Resultate liefert.

Leitisotope in der Landwirtschaft

Es ist vorteilhaft, zuerst die Verwendung von Leitisotopen für die Landwirtschaft zu betrachten, weil dieses Gebiet uns allen mehr oder weniger vertraut ist und die Experimente hier genügend einfach und direkt sind, um leicht einsehen zu

können, warum die Verwendung von Leitisotopen so große Vorteile bringt. Die vielleicht eindrucksvollsten Anwendungen von Leitisotopen dienen hier weniger der Grundlagenforschung, als vielmehr praktischen Zielen, von denen wir jetzt einige betrachten wollen.

Es ist eine wohlbekannte Tatsache, auch wenn die Gründe nicht völlig verstanden werden, daß sehr kleine Mengen bestimmter Elemente, der sogenannten *Spurenelemente,* auf das Wachstum der Pflanzen großen Einfluß haben. Fügt man dem Erdboden Spurenelemente hinzu, bei denen ein kleiner Bruchteil der Atome aus radioaktiven Atomen besteht, so kann man leicht und sehr direkt messen, wie lange die Spurenelemente im Boden bleiben, wie sie in die Wurzeln gelangen, welchen Weg sie dann nehmen und wie lange sie in der Pflanze bleiben. Wie im letzten Kapitel beschrieben — der Stoff X ist hier eine Pflanze oder der Boden —, folgen die Ergebnisse direkt aus der Zählrate, die man mit dem Geigerzählrohr an verschiedenen Stellen der Pflanze und des Bodens zu verschiedenen Zeiten mißt. Die praktischen Vorteile dieser Messungen sind offensichtlich: man kann jetzt genaue Beziehungen zwischen Art und Menge der aufgenommenen Spurenelemente und dem Einfluß auf die Ergiebigkeit der Ernte angeben, außerdem kann festgestellt werden, auf welche Weise die Spurenelemente am besten den Pflanzen zugeführt werden, wann dies am besten geschieht und welche Mengen benützt werden müssen. Man kann sich unschwer vorstellen, daß es viel schwieriger, teilweise vielleicht sogar unmöglich ist, diese Kenntnisse mit den herkömmlichen Methoden zu erlangen, also durch geduldiges Verändern der Bedingungen und langes Abwarten vieler Ernten, um die erreichten Wirkungen beurteilen zu können.

In gleicher Weise verwendet man Radioisotope viel zu Untersuchungen auf dem sehr wichtigen Gebiet der Pflanzendüngung. Obwohl man in der Landwirtschaft erst seit einigen Jahren Leitisotope benützt, konnte man mit den gewonnenen Ergebnissen doch schon eine Verbesserung des Ernteertrages und durch wirksamere Anwendung der Düngemittel auch eine Verringerung der Kosten erreichen. Die Bedeutung dieser Untersuchungen wird unterstrichen, wenn man sich vergegen-

wärtigt, daß allein in den USA jährlich über 1 Milliarde Dollar für Düngemittel ausgegeben werden. Es dürfte von Interesse sein, ein spezielles Ergebnis dieser Untersuchungen zu betrachten, nämlich die Aufnahme des wichtigen Elementes Zink durch Obstbäume. Man benützte als Leitisotop radioaktives Zink und stellte fest, daß die Blätter Zink viel wirksamer aufnehmen als die Wurzeln, sogar bei Temperaturen unter dem Gefrierpunkt wurde das aufgespritzte Zink aufgenommen und legte in einem Zweig im Verlauf von ein bis zwei Tagen einen Meter und mehr zurück. Diese Ergebnisse wurden bald praktisch verwertet: man besprühte die Bäume im Winter mit Zink und steigerte so den Ertrag der nächsten Obsternte. In gleicher Weise untersuchte man mit radioaktivem Phosphor, P^{32}, wie man Phosphatdünger am besten anwendet, auch hier ergab sich das etwas überraschende Ergebnis, daß die Aufnahme durch Blätter bedeutend wirksamer erfolgt als durch die Wurzeln.

Außer praktischen Fragen, z. B. wie man den Pflanzen die benötigten Elemente am besten zuführt, gibt es die grundlegenden Fragen nach den Lebensvorgängen der Pflanzen — wie die Pflanzen wachsen, wie sie ihre Substanz bilden, wie sie regenerieren. Auch hier erweisen sich die Leitisotope als sehr nützlich. Die Resultate lassen sich zwar nicht so augenfällig in Mark und Pfennigen ausdrücken, das Verständnis der Lebensvorgänge der Pflanzen weist aber ebenfalls den Weg zu einer Verbesserung der Landwirtschaft. Das Studium des Wurzelwachstums ist ein interessantes Beispiel dieser Grundlagenforschung. Man bringt an verschiedene Stellen des Bodens P^{32}, untersucht dann die Radioaktivität der Pflanze in Abhängigkeit von der Zeit und kann so direkt das Schema des Wurzelwachstums bestimmen. Die zukünftigen praktischen Anwendungen bezüglich der Verteilung des Düngemittels bedürfen kaum der Erwähnung.

Einer der kompliziertesten Vorgänge, die in der lebenden Natur auftreten, ist die *Photosynthese,* deren Geheimnisse den Wissenschaftlern schon viele Jahrzehnte trotzen. Dieser fundamentale Vorgang ermöglicht den grünen Pflanzen, aus dem Wasser des Erdbodens, dem Kohlendioxyd der Luft und der Energie des Sonnenlichtes organische Stoffe aufzubauen,

also letzten Endes alles Lebensgeschehen auf der Erde. Obwohl der Gebrauch von Radioisotopen, hauptsächlich der von Radiokohlenstoff, C^{14}, unser Wissen über die Photosynthese sehr vergrößert hat, ist sie im einzelnen noch keineswegs geklärt. Würde es gelingen, die Photosynthese im Labor nachzuahmen, so könnten wir mit Hilfe des Sonnenlichtes, jedoch ohne grüne Pflanzen, fabrikmäßig große Mengen von Nahrungsmitteln herstellen; bisher ist aber nur, und zwar erst kürzlich, die Nachahmung einiger wichtiger Teilprozesse gelungen. Der fortgesetzte Gebrauch von Radioisotopen wird die Lösung dieses Problems sicher beschleunigen.

Leitisotope in Biologie und Medizin

Mit Leitisotopen kann im Rahmen der Lebensvorgänge von Mensch und Tier oft das Verhalten von Stoffen untersucht werden, die sich an sonst unzugänglichen Stellen befinden. So wird in dem gebräuchlichsten Vorlesungsversuch zur Erklärung der Leitisotope nachgewiesen, wie lange dem Körper zugeführtes Natrium braucht, um in die Blutbahn zu gelangen. Bei diesem einfachen und eindrucksvollen Versuch trinkt der Vortragende etwas Salzwasser, wobei das Salz außer dem normalen Na^{23} etwas radioaktives Na^{24} enthält, dann hält er einen Geigerzähler in die Nähe verschiedener Stellen seines Körpers und zeigt so, daß das in dem Wasser enthaltene Natrium innerhalb weniger Minuten in die Blutbahn und damit zu allen Teilen seines Körpers gelangt. Außerdem läßt sich dabei zeigen, wie lange das Blut braucht, um von einem Punkt des Körpers zu einem anderen zu gelangen.

Dieser einfache Versuch zeigt die große Bedeutung der Leitisotope für die Untersuchung physiologischer Vorgänge. Will man genau untersuchen, wie viele wichtige Stoffe in den Körper gelangen und wie sie dort in Körpersubstanz umgewandelt werden, so kann man dieses Experiment natürlich wesentlich verfeinern. Ein Beispiel bildet das für die Festigkeit der Knochen sehr wichtige Kalzium. Man kann sich leicht vorstellen, wie schwierig es war, vor der Verwendung von Leitisotopen festzustellen, auf welchem Weg das Kalzium in den Körper ge-

langt und wie lange es an verschiedenen Stellen bleibt. Heute kann man viele derartige Versuche durchführen, man fügt verschiedenen Nahrungsmitteln etwas radioaktives Kalzium bei, gibt sie Leuten verschiedenen Alters und stellt mit einem Geigerzähler fest, wie das Kalzium in den Körper gelangt. Eine wichtige Frage war z. B., bei welcher Entwicklungsstufe des Menschen Kalzium in den Körper eintritt und in den Zähnen abgelagert wird. Mit Hilfe von radioaktivem Kalzium wurde diese Frage leicht beantwortet und zwar wegen der äußerst kleinen Mengen von Radiokalzium, ohne irgendeine Gefahr für die betreffenden Personen. Es stellte sich heraus, daß Kalzium nicht nur während der frühen Kindheit, in der ein rascher Aufbau der Zähne erfolgt, sondern auch während des ganzen Erwachsenenlebens in den Zähnen abgelagert wird. Wie erwartet, wird bei Kindern viel mehr abgelagert; etwas überraschend aber war die Ablagerung bei Erwachsenen.

Eine andere, recht interessante Untersuchung betrifft den Zusammenhang zwischen dem von Hühnern gefressenen Futter und der Bildung von Eiern. Auch hier fügte man dem Futter einfach geeignete Leitisotope bei und untersuchte die Eier mit dem Geigerzählrohr. Man fand, daß das Ei Bestandteile von Futter enthielt, das 40 Tage vor dem Legen der Eier gefressen wurde, dagegen trug zum Aufbau der Schale wesentlich jüngeres Futter bei, drei Viertel der Schale gingen auf das am Vortag gefressene Futter zurück. Die Anwendungsmöglichkeit dieser und ähnlicher Untersuchungen für die Ernährung von Mensch und Tier ist offensichtlich.

Außer den Tausenden von Versuchen über das Verhalten des normalen Gewebes in Mensch und Tier werden viele andere über das durch verschiedene Krankheiten geschädigte Gewebe ausgeführt. Ein wichtiges Gebiet der Leitisotopenforschung beschäftigt sich damit, wie verschiedene Krankheiten den Blutkreislauf beeinflussen. Die Methode entspricht im Prinzip der für den beschriebenen Versuch mit Natrium verwendeten, nur wird sie natürlich sehr verfeinert, um genaue zahlenmäßige Ergebnisse zu erhalten. In diesem Zusammenhang kann jetzt eine andere bedeutungsvolle Anwendung der Radioisotope beschrieben werden. Bei allen bisherigen Beispielen sollten uns die Radioisotope immer nur an die Stellen lei-

ten, an die eine bestimmte Atomart im Verlaufe irgendeines Vorganges gelangt, jetzt handelt es sich um eine andere Aufgabe: die Bestimmung des gesamten im menschlichen Körper enthaltenen Blutvolumens. Auch diese Aufgabe ist mit den älteren Methoden recht schwierig, dagegen mit Radioisotopen ungemein leicht zu lösen. Ein kleines Volumen Flüssigkeit (menschliches Serum — albumin), das etwas radioaktives Jod (J^{131}) enthält, wird in die Blutbahn gespritzt. Nach etwa 15 Minuten hat sich die radioaktive Flüssigkeit über den gesamten Blutkreislauf verteilt. Man entnimmt diesem dann ein kleines Volumen Blut und bestimmt bei diesem mit einem Geigerzähler die Zahl der je Zeiteinheit und je Kubikzentimeter emittierten Strahlen. Das Blutvolumen läßt sich dann leicht berechnen; beträgt die Zählrate je Kubikzentimeter z. B. 0,1 Prozent der für die eingespritzte Flüssigkeit gemessenen, so ist offensichtlich die eingespritzte Flüssigkeit durch die Mischung mit dem Blut im gleichen Verhältnis verdünnt worden. Also ist das eingespritzte Flüssigkeitsvolumen 0,1 Prozent des gesamten Blutvolumens, und letzteres ist daher tausendmal so groß. Eine sehr ernste Anwendung fand diese Art der Blutvolumenmessung im Koreakrieg; man gebrauchte sie auf dem Schlachtfeld vor der Durchführung von Bluttransfusionen. Dieses Verfahren der *Isotopenverdünnung* wird oft für die Messung der Menge eines an einem unzugänglichen Ort befindlichen Stoffes benützt.

Eine der wichtigsten und schwierigsten Aufgaben der Erforschung kranken Gewebes ist das Studium des Krebses. Wir betrachten vorläufig noch nicht die Zerstörung der Krebszellen durch Verwendung großer Mengen Radioisotope, sondern die Erforschung des Krebswachstums mit Hilfe von Leitisotopen. Die Grundlagen des ungeregelten Zellenwachstums, also des Krebses, sucht man heute auf den verschiedensten Wegen zu erforschen, dabei werden häufig Radioisotope verwendet. Kürzlich wurde z. B. mit Leitisotopen gezeigt, daß sich der Stoffwechsel von Krebszellen von dem gesunder Zellen unterscheidet, d. h. daß Krebszellen zu ihrem Wachstum bestimmte Verbindungen mehr brauchen als gesunde Zellen. Aus diesen Erkenntnissen könnte sich die Möglichkeit ergeben, das Krebswachstum durch Entzug der dafür notwendigen Stoffe

zu verhindern, ohne dabei das gesunde Gewebe zu zerstören. Das gesamte Gebiet ist äußerst kompliziert, und diese Untersuchungen sind nur die ersten Schritte auf dem Weg zu einem Verständnis des Wachstums von gesundem und krebskrankem Gewebe. Man kann heute noch nicht abschätzen, welche Auswirkungen die Ergebnisse dieser Grundlagenforschung zeitigen werden.

Ein anderes ausgezeichnetes Beispiel der Grundlagenforschung ist die Untersuchung der Wirkungsweise von Insulin im Körper, sie verspricht wichtige Ergebnisse zu liefern. Insulin ist ein von der Bauchspeicheldrüse abgegebenes Hormon, das sehr wichtig für den Zuckerstoffwechsel ist. Insulinmangel hat Zuckerkrankheit zur Folge. Die bisherigen Ergebnisse mit radioaktivem Insulin haben gezeigt, daß der Zuckerstoffwechsel äußerst kompliziert ist; so fand man die im Blut vorkommende „Insulinase", die das Insulin zerstört, und außerdem ein Leberenzym, das die Wirkung der Insulinase hemmt. Aus diesen Ergebnissen scheint sich deutlich, wenn auch nicht sofort, die Möglichkeit einer Verbesserung der Behandlung der Zuckerkrankheit zu ergeben.

Kurz erwähnt werden soll die praktische Anwendung von Leitisotopen zur Feststellung der Lage von Tumoren (Krebsgeschwülsten). Diese Methode beruht darauf, daß krebsbefallenes Gewebe bestimmte Stoffe mehr aufnimmt als gesundes Gewebe, so absorbieren z. B. Gehirntumore bevorzugt Jod. Man spritzt radioaktives J^{131} in die Blutbahn ein und kann dann auf Grund der emittierten Gammastrahlung mit einem kleinen Geigerzählrohr die Ausdehnung des Tumors und damit auch die Möglichkeit einer operativen Entfernung feststellen. Solche Methoden kann man auch während der Operation anwenden.

Die Ortsbestimmung wird fast unmöglich, wenn aus einem Tumor Zellgruppen abwandern und an Stellen, die im ganzen Körper verteilt sein können und an denen sie normalerweise niemals vorkommen würden, zu Metastasen (Tochtergeschwülsten) weiterwachsen. Bei Schilddrüsenkrebs benützt man in diesem Fall radioaktives J^{131}. Das Schilddrüsengewebe absorbiert sehr stark Jod, und man kann durch die emittierte Gammastrahlung Metastasen feststellen, ganz gleich wo sie sich befinden. Mit dem in Fig. 36 gezeigten Apparat kann man den

ganzen Körper „abtasten" und erhält einen Lageplan der Metastasen. Mit Hilfe dieses Plans ist dem Arzt die genaue Ortsbestimmung der Metastasen und damit, je nach den Umständen, die operative Entfernung möglich.

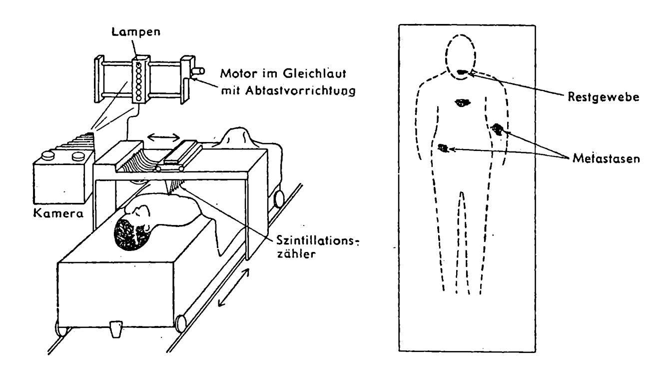


Fig. 36. Die Lokalisation der Metastasen eines Schilddrüsentumors mit Hilfe von J^{131}. Das eingespritzte J^{131} lagert sich bevorzugt im Schilddrüsengewebe ab. Die emittierte Strahlung wird mit Szintillationszählern nachgewiesen, und die Meßergebnisse werden auf einer photographischen Platte registriert.

Wir haben öfters erwähnt, daß Verbindungen, die Leitisotope enthalten, in die Blutbahn eingespritzt, der Nahrung zugesetzt oder auf andere Weise dem Stoff zugeführt werden, der untersucht werden soll. Nicht näher eingegangen sind wir aber auf die Schwierigkeiten, die sich ergeben, wenn in komplizierten Verbindungen radioaktive Atome eingebaut werden sollen. In einigen Fällen ist dies mit üblichen chemischen Verfahren möglich. Komplizierte organische Verbindungen, deren Moleküle Tausende von Atomen enthalten können, lassen sich *künstlich*, also im Laboratorium, meist nicht herstellen, man kann sie gewöhnlich nur aus Pflanzen oder Tieren gewinnen. Es bleibt also nichts übrig, als sie unter Verwendung radioaktiver Ausgangsprodukte auf natürliche Weise in Pflanzen und Tieren herzustellen. Diese Art der Gewinnung erfolgt in sogenannten *„Isotopenfarmen"*, in denen man verschiedene Pflanzen züchtet und dabei Düngemittel, Wasser oder Kohlen-

dioxyd benützt, die radioaktiv sind. Die Pflanzen bilden ihre Körpersubstanz weiterhin auf die normale Weise. Natürlich kann man keine kurzlebigen Radioisotope benützen, denn sie wären längst zerfallen, bis sich die organischen Verbindungen ausreichend gebildet hätten. Das Pflanzengewebe kann an Tiere verfüttert werden, die andere Verbindungen daraus aufbauen, die wieder die benützten Radioisotope enthalten. Man kann auf diese Weise viele komplizierte organische Verbindungen gewinnen, die Radioisotope enthalten und für die Untersuchung der Lebensvorgänge in lebendem gesunden und kranken Gewebe sehr wichtig sind.

Leitisotope in der Industrie

Die Industrie bedient sich der Leitisotope noch nicht so lange wie Biologie und Medizin, aber auch in ihrem Bereich nimmt heute die Zahl der Anwendungen von Leitisotopen ständig zu. Aus einer neueren Übersicht der Atomenergiekommission geht hervor, daß die Industrie durch Anwendung von Radioisotopen jährlich etwa eine halbe Milliarde Dollar spart. Eine dieser Anwendungen ist ein schlagendes Beispiel für die große Empfindlichkeit der Verfahren, die Leitisotope benützen; man erhält die Ergebnisse fast augenblicklich, während die älteren Verfahren monatelange geduldige Arbeit erfordern.

Das äußerst wichtige Gebiet der Technik, dem dieses Beispiel angehört, beschäftigt sich mit der Untersuchung des Verschleißes, und zwar besonders mit dem Verschleiß der in Metallbearbeitungsmaschinen verwendeten Schneidwerkzeuge. Bisher mußte man bei Untersuchungen des Verschleißes von Werkzeugen diese lange Zeit benützen, um einen ausreichend großen Abrieb zu erhalten. Wollte man wissen, wie sich verschiedene kleine Änderungen der Werkzeugeigenschaften, z. B. Veränderungen des zur Herstellung benützten Stahles, auf den Verschleiß auswirken, so mußte man monatelange Untersuchungen durchführen.

Heute bestrahlt man das Werkzeug in einem Reaktor, so daß ein Teil seiner Atome radioaktiv wird, und benützt es dann in der betreffenden Maschine. Das vom Werkzeug abgeriebene

radioaktive Material haftet an den bei der Bearbeitung entstehenden Spänen. Der Verschleiß wird bestimmt, indem man die von den Spänen emittierte Strahlung auf die übliche Weise mißt. Die Empfindlichkeit ist so groß, daß bereits nach wenigen Sekunden abgeriebenes Werkzeugmaterial nachgewiesen werden kann, während es früher Wochen dauerte, bis der Abrieb genügend groß war. Es kann sogar festgestellt werden, wie das abgeriebene Material auf einem Span verteilt ist, was Schlüsse auf den Verschleißvorgang ermöglicht.

Auch den wichtigen Verschleiß der Kolbenringe in Verbrennungsmotoren untersucht man auf diese Weise. Die Kolbenringe werden in einem Reaktor einige Wochen bestrahlt und dann in einem Versuchsmotor verwendet. Das abgeriebene, radioaktive Material der Kolbenringe kann bereits nach einigen Sekunden in dem Schmieröl nachgewiesen werden. Die Abhängigkeit des Verschleißes von der Ölbeschaffenheit und dem Kolbenringmaterial kann also schnell und genau festgestellt werden. Die Kosten dieses neuen Verfahrens betragen nur 2 Prozent der früheren. Es ist offensichtlich, daß man den Verschleiß irgendwelcher anderer bewegter Maschinenteile in ähnlicher Weise messen kann.

Der Verschleiß von Werkzeugen, Zahnrädern und allen bei technischen Vorgängen bewegten Teilen ist so wichtig, daß es gut möglich ist, daß in rein finanzieller Hinsicht die größten Vorteile der Atomenergie in den nächsten Jahren auf diesem Gebiet liegen. In den USA werden für die maschinelle Bearbeitung von Metallen in Drehbänken, Bohrmaschinen, Fräsmaschinen usw. jährlich etwa 10 Milliarden Dollar ausgegeben. Könnten durch die Verwendung von Radioisotopen die Konstruktion der Maschinen und die Arbeitsmethoden so weit verbessert werden, daß sich eine zehnprozentige Einsparung ergibt, so entspräche dies bereits einer jährlichen Ersparnis von einer Milliarde Dollar.

Eine sehr wichtige Art des Verschleißes, die uns allen recht vertraut ist, haben wir noch nicht erwähnt: die Abnützung von Autoreifen. Die zugrunde liegenden Vorgänge sind zur Zeit Gegenstand ausgedehnter Untersuchungen. Man setzt dabei dem Gummi des Reifens radioaktives Material zu und mißt dann die Strahlung des radioaktiven Abriebs, der auf der

Unterlage haftet, auf welcher der Reifen gelaufen ist. Auch hier kann die Größe des Abriebs fast sofort festgestellt werden. Es ist nicht mehr nötig, die Reifen Tausende von Kilometern laufen zu lassen, die einzige Methode, mit der man früher ihre Abnützung messen konnte.

Im Zusammenhang mit der bereits erwähnten Isotopenfarm sei darauf hingewiesen, daß man den Einbau von radioaktiven Kohlenstoffatomen in Gummimoleküle dadurch erreicht, daß man Gummibäume in einer Atmosphäre wachsen läßt, die radioaktives Kohlendioxyd enthält. Die so gekennzeichneten Gummimoleküle benützt man zur Untersuchung des Verhaltens von Gummi bei verschiedenen industriellen Vorgängen. Auch dieses grundlegende Studium der Veränderungen des Gummimoleküls kann sehr wohl zu praktischen Anwendungen, also z. B. zu besseren Autoreifen führen.

Der routinemäßige, also nicht für die Forschung bestimmte Gebrauch von Radioisotopen nimmt in der Industrie schneller zu als auf jedem anderen Gebiet. Wir beziehen uns auf das weite Gebiet der *industriellen Kontrolle.* Hier zeigt sich die ungemein vielseitige Verwendbarkeit der Radioisotope, man schätzt die jährlich erzielten Ersparnisse auf über 100 Millionen Dollar. Radioisotope haben hier große Vorteile, weil sie die ständige Überwachung und Regelung bestimmter industrieller Vorgänge ermöglichen, ohne daß diese unterbrochen werden müssen und Zeit verlorengeht, wie es bei der Entfernung und anschließenden Untersuchung von Proben der Fall ist.

Die heute am meisten mit Radioisotopen durchgeführte industrielle Kontrolle ist die Dickenmessung von in Bandform hergestellten Folien aus Metallen, Kunststoffen, Papier und anderen Stoffen. Das Prinzip eines dazu verwendeten *Dickenmeßgerätes* zeigt Fig. 37. Auf der einen Seite der Folie wird das Radioisotop, auf der anderen Seite das Nachweisinstrument, ein Geigerzählrohr oder ein Szintillationszähler, angebracht. Die mit dem Zähler je Zeiteinheit gemessene Zahl von Impulsen ist ein Maß für die Dicke der Folie. Wie bei allen derartigen industriellen Verfahren wird das Ergebnis der Messung, hier die Zahl der je Zeiteinheit gemessenen Impulse zur Regelung des Verfahrens, in diesem Fall zum Erzielen einer

konstanten Foliendicke benützt. Würde die Foliendicke z. B. etwas abnehmen, so würde entsprechend die Zahl der Impulse etwas zunehmen, sich also eine Abweichung des Meßwertes vom Normalwert einstellen. Diese Abweichung dient zur Regelung des Verfahrens, das hier so beeinflußt wird, daß die Foliendicke wieder den richtigen Wert erreicht.

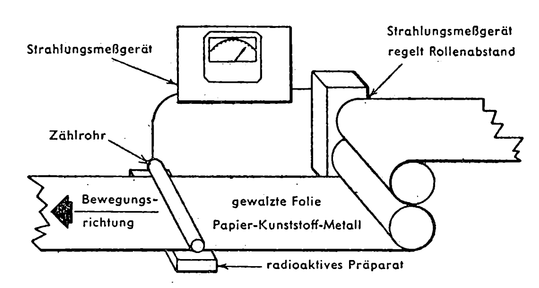


Fig. 37. Das Prinzip der Wirkungsweise eines Dickenmeßgerätes, in dem ein Radioisotop benutzt wird.

Um das Thema der industriellen Kontrolle etwas mit unseren häuslichen Bedürfnissen in Verbindung zu bringen, wollen wir kurz beschreiben, wie man das Dickenmeßgerät zur Kontrolle der in fabrikmäßig hergestellten Zigaretten enthaltenen Tabakmenge benützt. An Stelle der Folie tritt hier der mit Tabak gefüllte Papierzylinder, der anschließend in die einzelnen Zigaretten geschnitten wird. Gemessen wird die in einer bestimmten Länge des Papierzylinders enthaltene Tabakmenge. Weicht der Meßwert vom Normalwert ab, dann wird die Tabakzufuhr so geregelt, daß der Normalwert wieder erreicht wird. Das Gewicht der Zigaretten, das der in ihnen befindlichen Tabakmenge proportional ist, kann auf diese Weise bis auf 0,2 Prozent konstant gehalten werden. Das Dickenmeßgerät bringt bei dieser Anwendung so viele Vorteile, daß es heute praktisch in allen Zigarettenfabriken benützt wird.

Eine andere Art der industriellen Kontrolle, die mit Radioisotopen durchgeführt werden kann, ist die Messung und die Regelung der Mischung großer Mengen verschiedener Flüssigkeiten, wie sie bei vielen industriellen Verfahren notwendig ist. Um bei einem kontinuierlichen Prozeß günstigste Ver-

hältnisse zu erreichen, muß die Mischung möglichst schnell durchgeführt werden. Die Vollständigkeit der Mischung läßt sich leicht dadurch messen, daß man einem Bestandteil ein Radioisotop zufügt und in dem Behälter, in dem die Mischung stattfindet, einen Zähler anbringt; liefert der Zähler einen konstanten Meßwert, so zeugt das von einer gleichmäßigen Mischung der Flüssigkeiten. Auf diese Weise kann der Mischvorgang sowohl untersucht, was für die Konstruktion der benützten Anlagen wertvoll ist, als auch ständig überwacht werden. Sehr wichtig ist diese Art der Mischungsüberwachung, die eine Abweichung von den besten Bedingungen sofort anzeigt, in der Erdölindustrie und zwar besonders bei den großen Raffinerien, die durch die Krackung (Hitzezerlegung) der Erdölmoleküle eine große Zahl von Produkten erzeugen. Wegen der Empfindlichkeit der Nachweisinstrumente können so kleine Mengen von Radioisotopen benützt werden, daß sich keine Gefährdung des Personals ergibt. Außerdem ist es gewöhnlich nicht sehr schwierig, ein Radioisotop mit so kurzer Halbwertszeit zu finden, daß die Aktivität der Produkte nach dem Verlassen der Fabrik praktisch verschwunden ist und keine Gefahr mehr besteht.

Medizinische Behandlung mit Radioisotopen

Wir haben bereits gesehen, daß Materie beim Durchgang von Strahlung nicht unverändert bleibt, einem Teil der Atome werden Elektronen entrissen. Diese Tatsache ermöglicht den Nachweis der Strahlung mit Zählern. Werden sehr vielen Atomen Elektronen entrissen, ist also die aufgenommene Strahlungsdosis, d. h. die insgesamt absorbierte Strahlungsenergie groß, so können sich merkliche Veränderungen des bestrahlten Stoffes ergeben. Im Gegensatz zu den Leitisotopen handelt es sich bei den im folgenden betrachteten Anwendungen von Radioisotopen um die Erzielung solch merklicher Veränderungen.

Im Vergleich mit den mannigfaltigen Anwendungen der Leitisotope ist der Gebrauch von Radioisotopen großer Aktivität noch im Anfangsstadium. Über die Anwendungen starker

Strahlungsquellen muß noch viel gelernt werden, auch die notwendige völlig sichere Handhabung erfordert noch viel Arbeit. Man kann aber als sicher annehmen, daß der Gebrauch von starken Strahlungsquellen in den nächsten Jahrzehnten schnell zunehmen wird. Wir könnten über viele Möglichkeiten der Anwendung diskutieren, wir wollen aber in diesem und dem nächsten Abschnitt nur zwei der wichtigsten, die sich in rascher Entwicklung befinden, betrachten. Bei der ersten handelt es sich um ein Heilverfahren, das im Prinzip schon seit etwa 50 Jahren benützt wird, bei der zweiten um die Sterilisation von Nahrungsmitteln, eine völlig andere Anwendung, die sich als sehr nützlich erweisen kann.

Bei Bestrahlung mit genügend großen Dosen werden die Zellen lebenden Gewebes getötet. Je nachdem, wie viele Zellen getötet werden, ergeben sich mehr oder weniger große Veränderungen des bestrahlten Gewebes. Im Moment wollen wir uns nur mit der absichtlichen Zerstörung kranken Gewebes beschäftigen. Die ungewollte Bestrahlung wollen wir in einem späteren Kapitel diskutieren. Eine sehr ernste Anwendung finden Radioisotope bei der Zerstörung krebskranken Gewebes; obwohl die erreichten Behandlungserfolge nicht übertrieben werden dürfen, geben sie doch zu berechtigten Hoffnungen Anlaß.

Die natürlich vorkommenden radioaktiven Stoffe, z. B. Radium, benützt man schon seit etwa 50 Jahren zur Krebsbehandlung. Die Behandlung ist aber durch folgende Umstände behindert: es stehen nur wenige radioaktive Elemente zur Verfügung, die außerdem sehr selten und teuer sind; Radium darf dem Körper nicht zugeführt werden, weil es sich im Knochenmark ablagert und in dem dort befindlichen blutbildenden Gewebe Krebs verursacht; wegen der sehr durchdringenden Gammastrahlung des Radiums ist es schwierig, krankes Gewebe zu bestrahlen, ohne umliegendes gesundes Gewebe zu zerstören. Durch den Bau von Kernreaktoren hat sich die Situation wesentlich geändert. In diesen können heute große Mengen *jeden* Elementes radioaktiv gemacht werden. Es stehen also billige Radioisotope mit sehr verschiedenen chemischen und physikalischen Eigenschaften zur Verfügung. Man hat Radioisotope, die so schnell zerfallen, daß sie ohne Gefahr dem

Körper zugeführt werden können; oder sie lagern sich auf Grund ihrer chemischen Eigenschaften bevorzugt in bestimmten Organen ab, so daß die Bestrahlungswirkung auf diese konzentriert wird. Außerdem können sie auch nach der Art der benötigten Strahlung, z. B. einer wenig durchdringungsfähigen, ausgesucht werden. Dieser weite Spielraum der Eigenschaften ermöglicht eine Vielzahl von Behandlungsmethoden, die am besten durch einige Beispiele verdeutlicht werden.

Ein gutes Beispiel für die Konzentration der Bestrahlung auf ein bestimmtes Organ bietet die Behandlung von Schilddrüsenerkrankungen mit radioaktivem Jod. Dem Körper zugeführtes Jod lagert sich überwiegend in der Schilddrüse ab. Soll also bei der Hyperthyreose, so bezeichnet man die Überfunktion der Schilddrüse, ein Teil der Drüse zerstört werden, so führt man dem Patienten etwas im Reaktor hergestelltes radioaktives Jod zu; die von diesem emittierte Strahlung zerstört dann einen Teil der Schilddrüse, ohne anderes Körpergewebe zu beeinflussen, außerdem zerfällt das Radiojod ziemlich rasch. Diese Behandlungsmethode ist bereits so gut ausgebildet, daß sie schon in Zehntausenden von Fällen Anwendung fand.

Sehr geeignet für die Behandlung von Hautkrebs ist radioaktiver Phosphor (P^{32}), er emittiert nämlich nur Betastrahlung und keine Gammastrahlung. Wegen der geringen Reichweite der Betateilchen, wie sie Fig. 7 zeigt, wird nur eine dünne Schicht des bestrahlten Stoffes beeinflußt. Bei der Behandlung des Hautkrebses bringt man auf die Haut eine dünne Lage von radioaktivem Phosphor, die von diesem emittierten Betateilchen zerstören dann einen Teil der Hautzellen, ohne das darunterliegende Gewebe zu beeinflussen, wie es bei Verwendung von Radium der Fall wäre. Sprüht man den radioaktiven Phosphor auf die Außenseite eines Gummiballons auf, den man in den Magen einführt und dort aufbläst, so kann man auf die gleiche Weise die Magenschleimhaut behandeln.

Man darf aus den angeführten Beispielen nicht schließen, daß diese Behandlungsmethoden universell verwendbar sind, denn es ist keineswegs einfach, Radioisotope mit den gewünschten Eigenschaften zu finden. Das Radioisotop sollte im Idealfall ein bestimmtes, vielleicht tief im Körper gelegenes Gewebe bestrahlen und dabei kein anderes Gewebe schädigen.

Auf die Suche geeigneter Radioisotope und die Entwicklung neuer Behandlungsverfahren für bestimmte Organe wird aber viel Mühe verwendet, und man kann sicher annehmen, daß die Resultate einen weiteren Ausbau der Methode der selektiven Absorption ermöglichen.

Für die Krebsbehandlung mit Strahlungsquellen, die sich außerhalb des Körpers befinden, wird heute neben Radium sehr häufig radioaktives Kobalt verwendet, das sich in Kernreaktoren in großen Mengen und sehr billig herstellen läßt. Es wurden Kobaltquellen hergestellt, deren Aktivität der des gesamten in der Welt benützten Radiums gleichkommt. Natürlich erfordert die Benützung solcher Quellen eine sorgfältige Abschirmung, die das Personal schützt und die Strahlung nur in einer vorgegebenen Richtung austreten läßt, so daß nur der vorgesehene Teil des Körpers bestrahlt wird. Ein derartiges Fernbestrahlungsgerät zeigt Fig. 38. Die Drehung der Quelle um den Körper des Patienten ermöglicht eine ständige Bestrahlung des kranken Gewebes bei geringster Schädigung des umliegenden Gewebes.

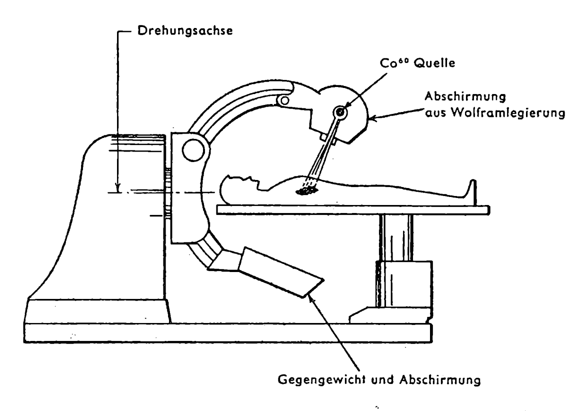


Fig. 38. Ein Fernbestrahlungsgerät, mit dem die Strahlung einer starken Radiokobaltquelle so angewendet wird, daß bei der Bestrahlung eines Tumors das gesunde Gewebe möglichst wenig geschädigt wird. Der Apparat wird um eine Achse gedreht, die durch den Tumor verläuft, dieser wird dadurch ständig bestrahlt, während das gesunde Gewebe nur eine relativ geringe Strahlungsdosis empfängt.

Strahlensterilisierung von Nahrungsmitteln

Die Anwendungsmöglichkeiten der Bestrahlungswirkungen sind zum Teil bereits verwirklicht, bei anderen wird dies in naher Zukunft geschehen. Ein Gebiet, auf dem sich nützliche Ergebnisse bereits abzeichnen, ist die Herstellung neuer Pflanzenarten durch Mutationen, die durch Bestrahlung ausgelöst werden. Weil jedoch die meisten Mutationen schädlich sind, werden wir auf dieses Thema kurz in Kapitel VIII zurückkommen, in dem wir das weite Gebiet des Einflusses der Strahlung auf Vererbungsvorgänge behandeln. Eine andere Möglichkeit, die aber noch keine praktische Anwendung gefunden hat, besteht in der Veränderung chemischer und physikalischer Stoffeigenschaften durch Bestrahlung. Das von uns betrachtete Beispiel behandelt die Sterilisierung von Nahrungsmitteln durch Bestrahlung. Ausgedehnte Experimente zeigten, daß mit genügend großen Gammastrahlungsdosen eine Sterilisation möglich ist, ohne daß die Nahrung radioaktiv wird, wie es bei der Bestrahlung mit Neutronen der Fall ist.

Natürlich spielt die Kostenfrage eine Rolle; würden sich die Kosten der Strahlungssterilisierung je Kilo auf einige 10 Pfennige belaufen, so wäre sie wirtschaftlich untragbar. Allerdings könnte sie trotzdem einige Anwendungen finden, z. B. für militärische Zwecke, bei denen die Kosten nicht ausschlaggebend sind.

Es gibt verschiedene Wege, Gammastrahlung nicht allzu teuer zu erzeugen. Einer besteht darin, Brennstoffelemente nach ihrer Entfernung aus dem Reaktor zu benützen. Wegen der großen Zahl der in ihnen enthaltenen Spaltbruchstücke emittieren diese sehr viel Gammastrahlung. Die *verbrauchten Brennstoffelemente*, d. h. die, in denen so viel U^{235} durch Kernspaltung zerfallen ist, daß sie zur Aufrechterhaltung der Kettenreaktion nicht mehr geeignet sind, müssen sowieso aus dem Reaktor entfernt werden, so daß kaum zusätzliche Kosten entstehen. Die Atomenergiekommission hat kürzlich angekündigt, daß die verbrauchten Brennstoffelemente des Materialprüfungsreaktors in Arco, Idaho, für 100 Dollar jährlich gemietet werden können. Wegen der geringen Zahl erhält aber

ein Verbraucher höchstens 4 Brennstoffelemente. Außerdem kann man in Reaktoren Gammaquellen aus radioaktivem Kobalt herstellen und diese geometrisch so anordnen, daß eine möglichst große Intensität der Gammastrahlung erreicht wird. Fig. 39 zeigt diese Anordnung, die typisch für die vorgeschla-

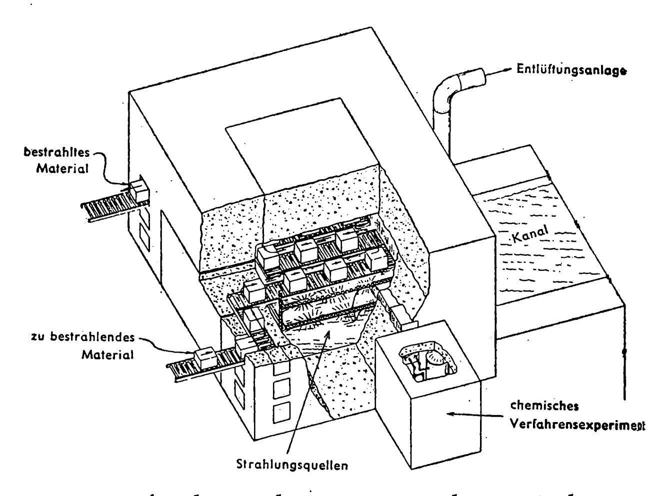


Fig. 39. Eine für die Sterilisierung von Nahrungsmitteln vorgeschlagene Anordnung. Die Nahrungsmittel werden an Gammastrahlungsquellen, hier sind es die Brennstoffelemente eines Reaktors mit den vielen enthaltenen Spaltprodukten, vorbeibewegt. Um die Strahlungsgefahr zu vermeiden, erfolgt der Transport der Brennstoffelemente vom Reaktor weg in einem wassergefüllten Kanal.

genen ist; ein Transportband bewegt die Nahrungsmittel, die sterilisiert werden sollen, an den Brennstoffelementen vorbei, die ganze Einrichtung befindet sich in einem gut abgeschirmten Raum.

Die Versuche zeigten, daß Fleisch so sterilisiert werden kann, daß es sich ohne Kühlung mehrere Monate hält. Allerdings stellten die Freiwilligen, die das Fleisch gegessen haben, fest, daß der Geschmack durch die Strahlungssterilisierung wesentlich gelitten hatte. Der Vorteil, leicht verderbliche Nahrungsmittel ohne Kühlung beliebig lange aufbewahren zu

können, ist aber so groß, daß die anfallenden Probleme heute intensiv erforscht werden. Wenn die Sterilisierung im Reaktor vorgenommen werden könnte, wäre sie wesentlich praktischer und billiger. Kürzlich wurde angekündigt, daß für die US-Armee ein Reaktor geplant und gebaut werden wird, in dem durch geeignete Anordnung von Abschirmungen erreicht werden soll, daß die Neutronen von der Gammastrahlung getrennt werden, so daß der Reaktor zur Sterilisierung verwendet werden könnte, ohne daß die Nahrungsmittel durch Neutronen aktiviert werden. Trotz der offensichtlichen Schwierigkeiten machten elf Firmen den Vorschlag, sich an diesem Projekt zu beteiligen; gebaut werden soll der Sterilisierungsreaktor durch die Kaiser Company in Stockton, Kalifornien.

VII

DAS INTERNATIONALE ATOM

> Die Behörde soll danach streben, den Beitrag der Atomenergie für Frieden, Gesundheit und Wohlfahrt überall in der Welt zu beschleunigen und zu vergrößern.
>
> *Aus der Satzung der Internationalen Atomenergiebehörde, angenommen am 23. Oktober 1952, Vereinte Nationen, New York.*

Bisher haben wir unsere ganze Aufmerksamkeit praktisch nur den vielen Wegen gewidmet, auf denen die Atomenergie der Menschheit heute schon Nutzen bringt, der Energie, der Grundlagenforschung und den Radioisotopen. Wir haben auch deutlich gemacht, wie sich dieser Nutzen über unsere gegenwärtige Betrachtung hinaus weiterentwickeln kann; Voraussetzung ist natürlich die richtige Handhabung der Atomenergie durch den Menschen, er muß lernen, mit ihr zu leben und darf sich nicht von ihr vernichten lassen. Es ist also angebracht, daß wir wieder über die zwei Seiten der Atomenergie nachdenken, ihre Anwendung für Krieg und Frieden. Seitdem wir anfangs beschrieben haben, wie beide Seiten sich zusammen entwickeln und praktisch untrennbar sind, kamen wir auf den Gesichtspunkt der Zerstörung nicht mehr zurück, sondern wir konzentrierten uns ausschließlich auf die nützlichen Anwendungen der Atomenergie, die sich schon in unserem eigenen Leben als so wertvoll erweisen.

Wir können aber die negativen Seiten der Atomenergie nicht völlig vernachlässigen. Würden sie durch einen weltweiten Konflikt, bei dem Atom- und Wasserstoffbomben angewandt werden, in Erscheinung treten, so könnten sie alle bereits erzielten und die Möglichkeit vieler weiterer Gewinne auslöschen. Die zerstörerische Seite der Kernverschmelzungs- und der Kernspaltungsenergie tritt praktisch nur bei ihrer Verwen-

BROOKHAVEN
MEDICAL RESEARCH
REACTOR

Fig. 32 Ein Reaktor, der gegenwärtig im Brookhaven-National-Laboratorium gebaut wird und ausschließlich medizinischen Zwecken dienen soll. Es wird gezeigt, wie die Bestrahlung von Gehirntumoren mit Neutronen vor sich geht.

Fig. 40. Das erste englische Atomkraftwerk in Calder Hall (British Information Service).



Fig. 41. Die Eröffnungssitzung der „Internationalen Konferenz über die friedliche Verwendung der Atomenergie" in Genf im August 1955 (Magnum Photos).

dung als Waffe in Erscheinung. Natürlich sind auch mit den friedlichen Anwendungen der Atomenergie Gefahren verbunden, es handelt sich dabei aber mehr um eine Angelegenheit der industriellen Sicherheit, ein allerdings kompliziertes Sachgebiet, dessen Behandlung wir auf das nächste Kapitel verschieben. Ungeheuer viel schwerwiegendere Gefahren erwachsen aus der Möglichkeit, daß die Atomenergie als militärische Waffe benützt wird und dabei Verheerungen anrichtet, die fast über unser Vorstellungsvermögen gehen.

Während wir nicht die Absicht haben, die zerstörerische Seite der Atomenergie, also ihren Gebrauch als Waffe, oder alle die komplizierten Faktoren, die bei der internationalen Kontrolle der Bomben eine Rolle spielen, zu behandeln, ist es aber sehr angebracht, daß wir die internationalen Belange der friedlichen Anwendung der Atomenergie betrachten. Die entstehende weltweite Zusammenarbeit auf dem Gebiet der friedlichen Verwendung der neuen Energie könnte bei der Verhinderung des Atomkrieges die wichtigste Rolle spielen. Allein vom Standpunkt des physischen Wohlbefindens aus betrachtet, verdient die internationale Zusammenarbeit auf dem Gebiet der Atomenergie größte Aufmerksamkeit, weil sie der ganzen Welt materielle Gewinne ermöglicht. Zusätzliche Bedeutung erlangt die gründliche Untersuchung dieser Zusammenarbeit von einem anderen Gesichtspunkt aus. Die erhöhte Bedeutung beruht auf der sehr deutlichen Möglichkeit, daß sich das ganze Programm der „Atome für den Frieden", eine internationale Zusammenarbeit zum Wohl der Menschheit, unbehindert von bestehenden Organisationen rasch weiterentwikkeln kann. Auf diese Weise ist es sehr gut möglich, daß die auf dem neuen Gebiet erreichte Zusammenarbeit für ähnliche gemeinsame Unternehmungen auf anderen Gebieten beispielgebend wirkt und so schließlich das gegenseitige Vertrauen zwischen den Nationen zunimmt.

Die „Atome für den Frieden" könnten also nicht nur „Atome für friedliche Anwendungen", sondern „Atome zur Erreichung des Friedens" bedeuten. Das inoffizielle Motto „Atome für den Frieden" der Genfer Konferenz vom August 1955 wurde auf den Ausstellungen aller Nationen in betonter Weise gezeigt. Unser gegenwärtiger Gedankengang wird durch die russische

Form dieses Satzes gut erläutert, die wörtliche Übersetzung derselben lautet nämlich: „Atome *machen* Frieden". Diese Möglichkeit ist wirklich gegeben und vergrößert die Wichtigkeit der sich gegenwärtig rasch entwickelnden internationalen Belange der Atomenergie. Die Umwandlung von Masse in Energie kann nicht nur die Mittel für ein vollwertiges Leben aller Menschen liefern, sondern ihnen auch helfen, in Frieden und gegenseitigem Verständnis zu leben.

Wir wollen uns in dem gegenwärtigen Kapitel der internationalen Zusammenarbeit zur friedlichen Nutzung der Atomenergie und besonders dem großen Erfolg derselben, der Genfer Konferenz, widmen. Im folgenden Kapitel können wir uns dann den der Atomenergie eigenen Gefahren zuwenden, Gefahren, die sowohl mit dem friedlichen als auch mit dem militärischen Gebrauch der Atomenergie verbunden sind. Schließlich werden wir die ferne Zukunft betrachten, die Möglichkeit, daß der bei der Explosion der H-Bombe in Erscheinung tretende Prozeß, die Kernverschmelzung, nützliche Energie liefern kann. Das Problem der friedlichen Anwendung der in der H-Bombe stattfindenden Kernverschmelzung wirft bezüglich der internationalen Zusammenarbeit viele schwierige Fragen auf, denn die Kernverschmelzung ist noch weitgehend Militärgeheimnis und die Frage, wie weit das Programm der verschiedenen Länder fortgeschritten ist und welchen Einfluß dies auf die Landessicherheit nimmt, ist gegenwärtig von großer Bedeutung.

Internationale Atomenergie vor Genf

Zum Verständnis der sich gegenwärtig rasch ausdehnenden Zusammenarbeit auf dem Gebiet der Atomenergie ist es sehr zweckmäßig, wenn wir uns zuerst erinnern, was für eine Situation vor der Genfer Konferenz herrschte und wie es zur Konferenz kam. Tatsächlich ist es noch nicht lange her, daß die Atomenergie weltweite Bedeutung erlangt hat. 1945 wurde die Welt durch einen blendenden Blitz über Hiroshima auf die Atomenergie aufmerksam. Viele Wissenschaftler jedoch kannten das Geheimnis schon seit drei Jahren, seit der erfolg-

reichen Freisetzung von Atomenergie in einem Kernreaktor im Dezember 1942. Und heute, nur etwa zwölf Jahre, nachdem die Welt davon erfahren hat, und noch einige Jahre mehr nach dem geeigneteren Geburtsdatum der geregelten Kernkettenreaktion, sind die 1945 so eifrig prophezeiten großen Gewinne für die Menschheit im Entstehen.

In diesem Zusammenhang scheint der Morgen des 17. Januar 1955 besondere Bedeutung zu haben, denn an diesem Montagmorgen versammelten sich Wissenschaftler aus fünf Ländern zur Diskussion der Tagesordnung für die im August des Jahres geplante internationale Konferenz der Vereinten Nationen über die friedliche Nutzung der Atomenergie. Während im Gebäude der Vereinten Nationen in New York City ihre Sitzung stattfand, nahm das Unterseeboot „Nautilus" gerade Kurs auf das 100 Meilen entfernte Long Island Sound; das Fehlen des Dieselmotorauspuffes verdeutlichte die in der Welt erstmalige Anwendung der Kernenergie zur Fortbewegung. Am gleichen Morgen kündigte Rußland an, daß es plane, das kommunistische China und vier europäische Satellitenstaaten an spaltbaren Stoffen und dem technischen Wissen über Kernenergieanlagen teilhaben zu lassen. Obgleich zugegeben sei, daß das Zusammentreffen all dieser Ereignisse an einem Morgen vielleicht nicht ganz zufällig war, so betonte es doch die bevorstehende ausgedehnte Anwendung der Kernenergie und die gemeinsamen Bemühungen im Rahmen der ganzen oder zumindest der halben Welt.

Es ist gut, wenn wir uns erinnern, was zu den Ereignissen dieses Januarmorgens geführt hat, denn er hat für die Zukunft der Menschen weitreichende Bedeutung. Während der vorangegangenen fünf Jahre hatten die Zahl der im Besitz der Vereinigten Staaten befindlichen Atombomben, deren Wirksamkeit und Verwendungsbereich ständig zugenommen. Als natürliche Folge dieser Zunahme gewannen in gleichem Maß die Möglichkeiten einer anderen Verwertung unseres wachsenden Vorrates an spaltbarem Material mehr und mehr Beachtung. Es war klar, daß die mit irgendeiner groß angelegten industriellen Anwendung der Atomenergie verbundene Entwicklungsarbeit zu umfangreich wäre, um in geheimen staatlichen Laboratorien durchgeführt werden zu können. Um die

nichtmilitärische atomare Entwicklung möglichst rasch voranzutreiben, müßten also bisher geheime Unterlagen der Privatindustrie bekanntgegeben werden.

Als 1953 die Republikaner an die Regierung kamen, erhielt die Verwirklichung durch den politischen Klimawechsel einen deutlichen Auftrieb. Die republikanische Ansicht, daß die nationale industrielle Entwicklung so weit wie möglich von der Privatindustrie ausgehen soll, führte zu einer Betonung der Teilnahme der Industrie an der atomaren Entwicklung, nicht auf der Grundlage staatlicher Verträge, sondern aus freien Stücken. Die Industrie führte bereits viele atomare Forschungen durch, aber in geheimen Projekten, die vom übrigen Betriebsgeschehen getrennt waren. Die neuen Bestrebungen zielten auch auf eine ausgedehntere Veröffentlichung von Ergebnissen hin, weil geheime, unter staatlichen Verträgen gewonnene Ergebnisse eine Neigung haben, ungenützt zu bleiben. Auf Grund der eben erwähnten Einflüsse begann im ersten Jahr der republikanischen Regierung eine großzügigere Behandlung der Geheimhaltung wirksam zu werden.

Nachdem viel darüber diskutiert wurde, wie die Industrie informiert werden könnte, so daß sie zur schnelleren Entwicklung der industriellen Atomenergie beitragen kann, wurden zu dem McMahon-Gesetz viele Verbesserungsanträge gestellt. Dieses Gesetz galt in den Vereinigten Staaten seit dem Zweiten Weltkrieg für sämtliche Angelegenheiten der Atomenergie. Änderungen wurden hauptsächlich vorgeschlagen, um die freie Mitarbeit der Industrie an Kernreaktoren für die Energiegewinnung und die gemeinsame Arbeit mit anderen Nationen zu ermöglichen. Die wichtigen Bestimmungen des abgeänderten Atomenergiegesetzes von 1954, das am 30. August von Präsident Eisenhover unterzeichnet wurde, sind folgende:

Als Zweck des Programmes wurde angegeben, daß „die Entwicklung so gelenkt werden soll, daß der Weltfrieden gefördert, die allgemeine Wohlfahrt verbessert, der Lebensstandard erhöht und der freie Wettbewerb der Privatwirtschaft gestärkt wird". Das Gesetz ermöglicht zweiseitige Abkommen mit fremden Nationen einschließlich der Zuteilung von spaltbarem Material und anderen Stoffen, die für den Bau von im Ausland befindlichen Leistungs- und Forschungsreaktoren

notwendig sind, außerdem den Austausch von geheimen und freigegebenen Unterlagen. Nach dem Gesetz kann die Regierung der Privatindustrie unter Eigentumsvorbehalt Brennstoff zur Verfügung stellen, mit der Erlaubnis, die gewonnene elektrische Energie zu verkaufen. Die Atomenergiekommission kann jetzt auch entscheiden, ob geheime Unterlagen ohne vorherige vollständige FBI*-Untersuchung eingesehen werden können. Die Kommission hat Anfang November eine niedrige oder „L"-Freigabekategorie für industrielle Unterlagen eingeführt, für die Freigabe ist nur ein kurzer „Schein über nationale Tätigkeit" erforderlich. Dieses Verfahren ist bedeutend einfacher und schneller als die früher für die Einsicht geheimer Unterlagen erforderliche volle „Q"-Freigabe.

Es ist wichtig, sich den geschichtlichen Ablauf der Ereignisse von 1953 und 1954 vor Augen zu halten, denn es geht nicht auf die freundliche Haltung der Sowjets zurück, wie man auf Grund einer unkritischen Meinung über die freundschaftliche Gipfelkonferenz vom Juli 1955 urteilen könnte, daß auf der Genfer Konferenz der Industrie und den anderen Nationen die Kernenergie zugänglich gemacht wurde. Wie wir gerade gesehen haben, wurde die industrielle Atomenergie der freien Wirtschaft ein volles Jahr vor der öffentlichen Änderung der sowjetischen Haltung zugänglich gemacht, und die Pläne für Abänderungen unserer Politik wurden viel früher gefaßt.

Die Abänderungen des Atomenergiegesetzes und kurz darauf die Veröffentlichung des „Freigabe-Führers", in dem die Ergebnisse aufgeführt sind, die veröffentlicht werden können, waren nicht nur vom Entwicklungsstand der Atomenergie in den Vereinigten Staaten, sondern auch sehr entscheidend von unseren Ansichten über die Stellung der Sowjets auf diesem Gebiet abhängig. Kurz nach dem Krieg war die vorherrschende Meinung, daß die Sowjets, wenn sie keinen Zugang zu unseren geheimen Ergebnissen haben würden, unseren Vorsprung viele Jahre nicht aufholen könnten. Die Tätigkeit der Sowjets änderte aber diese Ansicht bald: innerhalb einiger Jahre stellte sich heraus, daß sie nicht nur Atombomben, sondern ebensogut Wasserstoffbomben herstellen konnten.

---

* Anm. d. Übers.: FBI ist die Abkürzung für Federal Bureau of Investigation.

Die Tatsache, daß die Zurückbehaltung von Ergebnissen nicht die Sowjets, aber sicher unsere eigenen Bemühungen aufhält, verlieh der Annahme des Grundsatzes der Sicherheit durch Taten an Stelle bloßer Geheimhaltung neuen, zusätzlichen Auftrieb. Entsprechend dieser Auffassung muß unser Programm vorangetrieben werden, um wirkliche Sicherheit zu erlangen, auch wenn dabei die Geheimhaltungsbestimmungen verringert werden. Unter dem gemeinsamen Einfluß dieser verschiedenen Faktoren verwandelte sich in den Jahren 1953 und 1954 das Gebiet der Atomenergie beinahe zwangsläufig von einem streng überwachten militärischen Tätigkeitsfeld in eines, auf dem die internationale Zusammenarbeit nicht nur wichtig, sondern auch wünschenswert war. Offensichtlich konnten die Sowjets Atombomben herstellen. Für die Durchführung hatten sie wahrscheinlich sowohl Anlagen für die Abtrennung des U^{235} von U^{238} gebaut als auch Kernreaktoren. Es war also logisch, anzunehmen, daß sie sich bei der industriellen Entwicklung der Atomenergie mit ungefähr den gleichen Dingen beschäftigen wie wir. Diese Tatsache, zusammen mit dem Wunsch der amerikanischen Industrie, sich an dem neuen Zweig der technischen Entwicklung zu beteiligen und der dringende Bedarf an Atomenergie, den viele kleine Nationen bedeutend mehr haben als die Vereinigten Staaten, beschleunigten den Wunsch, diese Dinge zugänglich zu machen. Dieser Tatbestand war die Grundlage für den Vorschlag einer weltweiten Zusammenarbeit auf dem Gebiet der Atomenergie, den Präsident Eisenhower im Dezember 1953 vor der UN machte; die Situation unterschied sich wesentlich von der vor fast zehn Jahren, als die UN ihre ergebnislose Diskussion über eine internationale Kontrolle der Atomenergie begann.

Präsident Eisenhowers Vorschlag einer „Atom-Interessengemeinschaft"

Als Präsident Eisenhower am 6. Dezember 1953 in seiner Rede vor der UN den Vorschlag einer Atom-Interessengemeinschaft machte, war die Situation aus den eben diskutierten

Gründen reif für gemeinsame Bemühungen der Welt auf dem Gebiet der Atomenergie. Die Rede des Präsidenten schaffte nicht die Bedingungen für das Zustandekommen der Zusammenarbeit, die Dinge bewegten sich bereits deutlich in dieser Richtung, aber sie lieferte den unmittelbaren, für das Entstehen greifbarer Ergebnisse notwendigen Anstoß. Damals versuchten viele kleine europäische Nationen, für die friedliche Verwendung der Atomenergie, hauptsächlich für die Gewinnung elektrischer Energie, Programme aufzustellen. Die Energiefachleute Europas, wo Brennstoffe vielfach selten und teuer sind, erwarteten, vielleicht durch die Unkenntnis vieler technischer Schwierigkeiten bestärkt, von der Atomenergie die Lösung ihrer Energieprobleme. Nach der eindrucksvollen Bekanntgabe von Eisenhowers Vorschlag wandten sich diese Fachleute zur schnellen Lösung ihrer Probleme gleich an die Vereinigten Staaten. Die ersten Energieengpässe in Europa und die möglichen Vorteile der Atomenergie für diese Länder waren offensichtlich. Ebenso offensichtlich wie die großen Hoffnungen der europäischen Ingenieure war die Möglichkeit einer großen Enttäuschung und einer Stellungnahme gegen die Vereinigten Staaten, wenn dem Vorschlag des Präsidenten nicht schnell greifbare Resultate folgen sollten.

Die letztere ungünstige Reaktion wurde überraschend schnell Wirklichkeit, denn als sich in den Monaten nach dem Vorschlag des Präsidenten keine Ergebnisse einstellten, wurde immer häufiger die Meinung laut, daß seine Rede reine Propaganda gewesen sei und kein Versuch der Verwirklichung erfolgt sei. In Wirklichkeit versuchten die Vereinigten Staaten und Rußland während dieser Zeit, sich über die Organisation der Atominteressengemeinschaft zu einigen, was den Europäern nicht bekannt war. Wie später veröffentlicht wurde, konnten keine greifbaren Ergebnisse erzielt werden, weil die Sowjets darauf bestanden, daß die Bomben lediglich auf der Grundlage eines einfachen Vertrages ausgeschaltet werden sollten. Als unserer Regierung nach vielen Monaten klar wurde, daß die Sowjets sich an dem Eisenhower-Plan nicht beteiligen würden, begannen die Vereinigten Staaten in verschiedenen Formen die internationale Zusammenarbeit mit den westlichen Ländern allein.

Im Herbst 1954 gaben die Vereinigten Staaten bekannt, daß im Rahmen des Programms zur Förderung der weltweiten nützlichen Anwendung der Atomenergie mehrere Schritte unternommen wurden: Wissenschaftler anderer Länder sollten auf einer Schule in Reaktortechnik ausgebildet werden (die Schule wurde später im Argonne-Laboratorium nahe Chikago eingerichtet), technische Veröffentlichungen sollten ins Ausland geschickt werden, um anderen Ländern zu helfen, und eine ziemlich große Menge, 100 Kilo, U^{235} sollte für die Verteilung im Ausland zur Verfügung gestellt werden. Es wurde auch vorgeschlagen, daß innerhalb eines Jahres eine internationale Konferenz über den friedlichen Gebrauch der Atomenergie abgehalten werden sollte. Diese Fortschritte und mehrere andere mit der biologischen Ausbildung zusammenhängende wurden durch das verbesserte Atomenergiegesetz von 1954 ermöglicht und zeigten deutlich, daß die vom Präsidenten im Dezember 1953 angekündigten Absichten der Vereinigten Staaten nicht Propaganda, sondern ernste Vorschläge für eine internationale Zusammenarbeit waren. Die meisten dieser Vorschläge rührten von dem neuen Vorsitzenden der AEC, Admiral Strauss, her, der die begeisterte Unterstützung des Präsidenten besaß.

Als sich im Winter 1954 die Planung der verschiedenen Schritte des Programms der Vereinigten Staaten weiterentwickelte, wurde offensichtlich, daß das vorgeschlagene internationale Treffen unter der Voraussetzung einer Beteiligung sämtlicher Nationen ein Ereignis größter Bedeutung werden würde. Es war auch klar, daß die westliche Welt die Verwirklichung des Nutzens der Atomenergie mit solcher Spannung erwartete, daß die Sowjets kaum umhin konnten, sich an den gemeinsamen Bemühungen zu beteiligen.

Die Vollversammlung der UN billigte im Dezember 1954 den Vorschlag der Vereinigten Staaten, eine internationale Konferenz abzuhalten. Unmittelbar darauf entwickelten sich die Dinge etwas langsam; seitens der AEC erfolgte keine schnelle Freigabe zusätzlicher Unterlagen, die viele Wissenschaftler als wesentlich für den Fortschritt der friedlichen Nutzung der Atomenergie ansahen. Als jedoch im Winter 1954 bekannt wurde, daß sich die europäischen Nationen von

dem Treffen einen wirklichen Einbruch in die Geheimhaltung atomarer Angelegenheiten erhofften, wurden in der AEC die Bemühungen beschleunigt, für die Zeit der Genfer Konferenz eine Freigabe grundlegender Reaktordaten durchzusetzen. Obgleich wir die sowjetische Ansicht über die Konferenz nicht kannten, stand fest, daß die westliche Welt von den Vereinigten Staaten die Freigabe wesentlicher Auskünfte über die friedlichen Anwendungen der Atomenergie erwartete.

Als Ende 1954 der Umfang der internationalen Konferenz deutlich wurde, zeigte sich, daß sie weit größer und wichtiger werden würde, als sich anfangs irgend jemand vorgestellt hatte. Es war, als hätten sich alle großen Nationen verpflichtet gefühlt, einen so lohnenden Plan zu unterstützen und als hätte sie schließlich die Begeisterung der kleineren Nationen in einen ernsthaften Wettbewerb getrieben. Weit entfernt von reiner Propaganda konkurrierten sie miteinander, eine Übersicht über alle Seiten der friedlichen Anwendung der Atomenergie zu geben.

Im Anfangsstadium der Konferenzplanung hat die AEC der Vereinigten Staaten diese mehr oder weniger den Vereinten Nationen übertragen, wohl in dem Gefühl, daß es sich um ein internationales Treffen handelte, das besser die Vertreter der UN in die Hand nahmen. Lange zuvor hatte die AEC aber viele ihrer besten Männer für die Vorbereitung der Konferenz eingesetzt. Viele Monate lang verbrachten diese Männer praktisch den ganzen Tag mit Vorbereitungen für Genf. Wie ernstlich sich die AEC letzten Endes bemühte, zeigt am besten der Entschluß, in Genf einen in Betrieb befindlichen Reaktor auszustellen, seine Fertigstellung in einigen Monaten und sein rechtzeitiges Eintreffen in Genf zur Eröffnung der Konferenz.

Trotz der zunehmenden Bedeutung des Treffens war es Anfang 1955 noch keineswegs klar, ob es zur ernsthaften Diskussion nützlicher Anwendungen der Atomenergie oder vorwiegend zu ausgedehnter Verbreitung von Propaganda dienen würde. Das Eintreten des letzteren Falles erschien im Januar 1955 schmerzlich wahrscheinlich, als eine von UN-Generalsekretär Hammarskjöld einberufene, aus 5 Mitgliedern bestehende Planungskommission im UN-Hauptquartier in

New York tagte. Skobeltzyn, der sowjetische Vertreter, begann damit, die oft wiederholte und entmutigende sowjetische Stellungnahme darzulegen: eine friedliche Verwendung der Atomenergie könnte kaum diskutiert werden, wenn nicht vorher alle Teilnehmer übereinkämen, die Atom- und Wasserstoffbomben zu verbieten. Diese auch bei allen früheren atomaren Diskussionen vorgebrachte sowjetische Stellungnahme drohte die Konferenz zum Stillstand zu bringen, als sie kaum begonnen hatte. In derselben Woche, in der das Treffen der kleinen Planungsgruppe abgehalten wurde, erläuterte Skobeltzyn in einer Radiosendung der Vereinten Nationen ausführlich den russischen Standpunkt, dabei handelte es sich keineswegs um eine persönliche Darstellung.

Trotz der anfänglichen russischen Einstellung schritt die Planung der Konferenz voran, eine Einteilung für die Einsendung von Berichten, ihre Auswahl für den Vortrag in Genf und der Druck der Berichte wurden festgelegt. Der Erfolg der Genfer Konferenz wurde sichergestellt, als einige Monate später die 73 Nationen, die einer Teilnahme zugestimmt hatten, auf die Einladung von Herrn Hammarskjöld hin über 1000 Berichte einsandten. Die ernsten Absichten der Sowjets wurden deutlich, als sie einen Bericht über das erste sowjetische atomare Kraftwerk mit einer Kapazität von 5000 Kilowatt elektrischer Leistung einsandten. Die vollständigen Einzelheiten dieses Kraftwerkes, dessen Existenz von vielen angezweifelt worden war, sollten dargestellt werden.

Die Genfer Konferenz der „Atome für den Frieden"

Die Monate zwischen dem Planungstreffen im Januar und der eigentlichen Konferenz im August waren in den Vereinigten Staaten durch eine ständig zunehmende Eile bei der Ausarbeitung von Berichten gekennzeichnet. Man sichtete in aller Eile eine große Menge freigegebener Unterlagen und baute sorgfältig entworfene Anlagen, die in Genf ausgestellt werden sollten. Als die ungeheure Bedeutung der Konferenz im Laufe der Monate immer deutlicher wurde, wuchsen auch die Bemühungen, bedeutsame Ergebnisse beizutragen. Weil

der Freigabe von Unterlagen in den Vereinigten Staaten stets eine Beratung mit den englischen und kanadischen Behörden vorausging, wurde eine Konferenz der drei Nationen abgehalten und die Vorschriften freier gestaltet, gerade noch rechtzeitig, um das neu freigegebene Material in den Berichten verwenden zu können, die den Vereinten Nationen für die Konferenz zugeschickt wurden.

Nachdem die Auszüge der an das Konferenzbüro der Vereinten Nationen eingesandten Berichte übersetzt und allgemein verfügbar waren, zeigte sich deutlich, daß alle Länder versuchten, auf den behandelten Gebieten möglichst gute Berichte darzubieten. Sehr erfreulich war, daß die sowjetischen Auszüge nichts von dem im Januar beim Planungstreffen vorgebrachten Propagandamaterial enthielten; sie brachten gute, solide technische Angaben, ohne Prahlereien oder politische Färbung. Die sowjetische Bereitschaft zur Zusammenarbeit zeigte sich klar, als die Sowjets im Juni zustimmten, alle ihre für Genf bestimmten Angaben von Kernwirkungsquerschnitten in das Brookhaven-Laboratorium, New York, zu schicken, so daß sie dort mit den Angaben anderer Länder verglichen werden und rechtzeitig gedruckt werden konnten, um auf der Konferenz verteilt werden zu können. Die Angaben trafen einige Wochen später in Brookhaven pünktlich ein und konnten deshalb in der Genfer Diskussion sehr wirksam verwendet werden.

Die Konferenz selbst erwies sich größer als man angenommen hatte. Die in Fig. 41 (Tafel) gezeigte Eröffnungssitzung im Palais des Nations vermittelt einen Eindruck von ihrem Umfang. Von den an die Vereinten Nationen eingesandten Berichten wurde etwa die Hälfte vorgetragen und gleichzeitig in mehrere Sprachen übersetzt. Zusätzlich zu den Berichten konnten die 1400 Delegierten und eine gleiche Zahl von Beobachtern die von verschiedenen Regierungen und vielen Industriefirmen ausgestellten zahlreichen Apparate studieren. Ich bin sicher, daß nach Ansicht aller Teilnehmer das hervorstechende Ereignis der Ausstellung der von den Vereinigten Staaten gebaute, in Fig. 42 (Tafel) dargestellte „Schwimmbad-Reaktor" war, in dem tatsächlich eine Kernkettenreaktion ablief. Das Publikum konnte sich um das zur Abschirmung der

Strahlung dienende wassergefüllte Becken herumstellen und den blauen Lichtschein betrachten, der die völlig geregelte und harmlose Freisetzung von Atomenergie andeutete. Nachdem während der zweiwöchigen Konferenz Tausende den Reaktor besichtigt hatten, wurde er offiziell der Schweiz übergeben, die ihn in Zürich für Forschungs- und Ausbildungszwecke aufstellte.

Die Fülle des dargebotenen Stoffes über nützliche Anwendungen der Atomenergie entspricht gerade dem, was wir bisher überall in diesem Buch bis zu einem gewissen Grad betrachtet haben. Wir brauchen also den weiten Bereich der diskutierten Themen von Leitisotopen bis zu Millionen von Kilowatt nicht besonders betonen. Für uns ist im Moment wichtig, daß eine große Menge von Unterlagen freigegeben wurde, die vorher zurückgehalten wurde. In Genf wurden diese Unterlagen frei diskutiert, ohne politische Verwicklungen. Ohne Zweifel beschäftigt sich jedes große Land mit den militärischen Anwendungen der Atomenergie und hielt daher die Ergebnisse bestimmter Teilgebiete zurück. Es war aber überraschend, wie wenige Verlegenheitssituationen sich ergaben, wenn sich die Diskussion nahe der Grenze bewegte, die geheime von veröffentlichten Angaben trennt. Man stimmte allgemein überein, daß die Vereinigten Staaten auf dem Gebiet der Technik in der Welt führend sind und demgemäß auf der Konferenz auch den größten Beitrag an technischen Ergebnissen geleistet hatten. Von einem engen Gesichtskreis aus könnte man schließen, daß wir in Genf Boden verloren haben, weil die anderen Länder von uns viel mehr lernten als wir von ihnen. Aber der große Gewinn der Vereinigten Staaten liegt nicht in den erhaltenen technischen Angaben (und wir sammelten wirklich viele wertvolle Angaben), sondern in der Ausführung der umfassenden, uneigennützigen Ansichten von Eisenhowers ursprünglichem Vorschlag, in dem überwältigenden, der Welt gegebenen Zeugnis, daß wir zur atomaren Marshall-Hilfe stehen, und daß wir bereits begonnen haben, die Gewinne des neuen Kernzeitalters mit der Welt zu teilen. Die von amerikanischen Wissenschaftlern gelieferten Hunderte von Berichten, die vollgepreßt waren mit Auskünften über Rohstoffe, Erzeugung elektrischer Energie, grundlegende Kerndaten und

Anwendungen in Biologie, Landwirtschaft und Medizin, waren offensichtlich keine leere Geste, sondern eine große Hilfeleistung für die ganze Welt.

Ein anderes positives, auf lange Sicht gesehen vielleicht das wichtigste Ergebnis der Genfer Konferenz war die erfolgreiche Zusammenarbeit zwischen östlichen und westlichen Wissenschaftlern. Erstens wurde öffentlich dargelegt, daß eine bestimmte Gruppe der Bevölkerung erfolgreich miteinander arbeiten kann, zweitens könnten die starken persönlichen Bindungen, die zwischen diesen Menschen entstanden, wenn sie im Laufe der Zeit fortgesetzt und gefördert werden, auf die Sowjetregierung einen deutlichen Einfluß hinsichtlich einer friedlichen Koexistenz ausüben.

Man kann sagen, daß die erste Wirkung bereits eingetreten ist, denn als die Vereinten Nationen im Herbst 1955 über die Abrüstung diskutierten, äußerte der Delegierte Lodge, daß das vorgeschlagene Überwachungssystem in analoger Weise wie die Internationale Atomenergiebehörde arbeiten und zur Schaffung gegenseitigen Vertrauens beitragen könnte. Wir sehen, daß hier die internationale Zusammenarbeit auf dem Gebiet der Atomenergie als erwiesen betrachtet wird und bereits als Beispiel für ähnliche Unternehmungen in anderen Tätigkeitsfeldern dient. Eine andere, etwa analoge, gemeinsame Bemühung stellt die internationale Untersuchung des von Kernbombenversuchen stammenden radioaktiven Niederschlages dar. Diese gemeinsame Arbeit schlugen die Vereinigten Staaten 1955 den Vereinten Nationen vor, und sie ist heute gut im Gange, und obwohl sie technischer Natur ist, kann sie für die Abrüstung wegen möglicher Entscheidungen über Bombentests eine Rolle spielen. Ein Erfolg dieser Unternehmung würde einen wesentlichen Schritt zum gegenseitigen Einvernehmen darstellen.

Das zweite, möglicherweise nützliche Ergebnis der in Genf angeknüpften persönlichen Beziehungen — der Einfluß der sowjetischen Wissenschaftler auf die Außenpolitik — ist mit der Stellung der Wissenschaftler in der sowjetischen Gesellschaft verbunden. Uns allen, die wir in Genf sowjetische Wissenschaftler getroffen hatten, wurde klar, daß sie sehr gut behandelte, beinahe verwöhnte Mitglieder der sowjetischen

Gesellschaft sind. Die zwanglosen Unterhaltungen, die im Laufe der Tage und als die anfängliche Schüchternheit schwand, immer mehr zunahmen, zeigten, daß sie sich überraschend frei über ihre Neigungen und Abneigungen äußerten, offensichtlich ohne Furcht vor Repressalien ziemlich frei die sie interessierenden Forschungsaufgaben wählen, sicher gut bezahlt und hinsichtlich ihrer Zukunft völlig sorglos sind. Abgesehen von der sprachlichen Schwierigkeit (die schnell geringer wurde, als sie sich immer mehr des Englischen bedienten, das sie anscheinend alle gründlich studiert haben), könnten die Diskussionen gut auf dem Treffen einer amerikanischen wissenschaftlichen Gesellschaft stattgefunden haben. Unseren Wissenschaftlern, die sowohl ihre Schwierigkeiten als auch ihre Erfolge mit den östlichen Gesprächspartnern diskutierten, wurde die gleiche Offenheit entgegengebracht. Die in dieser Atmosphäre entstandene gegenseitige Hochachtung hat eine solide Grundlage, und die wichtige Stellung der sowjetischen Wissenschaftler in ihrer Gesellschaft läßt erwarten, daß diese Hochachtung für uns sehr wahrscheinlich einige gute Früchte tragen wird. Es mag vielleicht keine reichliche Ernte sein, aber es ist sicher ein deutlicher Schritt vorwärts. Der Respekt der Sowjets für westliche Wissenschaft und Wissenschaftler war groß und unverhohlen; durch die von uns veröffentlichten Arbeiten waren ihnen die einzelnen Personen bekannt. Das brachte uns etwas in Verlegenheit, denn ihre Namen waren uns unbekannt, weil ihre Arbeiten vor der Genfer Konferenz nicht veröffentlicht waren. Sie machten keinen Hehl daraus, daß sie die russischen Übersetzungen vieler Bücher von uns als maßgebliche Quellen benützen. Zum Beispiel wurde mir als spontane Geste der Freundschaft von russischen Physikern bei zwei verschiedenen Gelegenheiten ein übersetztes Exemplar meines Buches über die Neutronenforschung geschenkt.

Am Ende dieses Kapitels wollen wir andeuten, wie einige der in Genf hergestellten Beziehungen bereits erweitert wurden und so die Grundlage abgeben für einen vorsichtigen Optimismus bezüglich der Fortdauer der nützlichen Ost-West-Verbindung der Wissenschaft. Zuerst werden wir aber den derzeitigen Stand mehrerer typischer Länder betrachten, um

den atomaren Fortschritt auf internationaler Ebene und den Genfer Optimismus hinsichtlich des atomaren Wohlstandes beurteilen zu können.

Fortschritt seit Genf

Seitdem in Zusammenhang mit der Genfer Konferenz die Geheimhaltungsvorschriften auf dem Gebiet der friedlichen Nutzung der Atomenergie weitgehend weggefallen sind, werden die erzielten Fortschritte meist veröffentlicht, und man braucht keine Geheimhaltungsschranken mehr zu durchdringen, um sie zu erfahren. Die Freigabe der Ergebnisse hat in fast allen Ländern die Programme so stark beschleunigt, daß es nicht mehr leicht ist, über den atomaren Fortschritt auf dem Laufenden zu bleiben. Besonders stark wurden die kleinen Länder angeregt, die sonst kaum ein Programm in Angriff hätten nehmen können. Die Tätigkeit auf der ganzen Welt hat so stark zugenommen, daß die Fülle der Ergebnisse geradezu verwirrend ist; nicht mehr die Geheimhaltung erschwert die ständige Kenntnisnahme, sondern der große Umfang. Die Schwierigkeit wird dadurch betont, daß jedes Land dazu neigt, seine Ergebnisse so darzustellen, daß dabei sein spezielles Programm in den leuchtendsten Farben geschildert wird. Auf diese Weise wird es dem Laien nahezu unmöglich, auch wenn er viel liest, richtig zu beurteilen, wer nun in der ganzen Angelegenheit wirklich „vorne dran ist". Wegen der Vielfalt eines Atomenergieprogramms kann sich fast jedes Land einige Themen aussuchen, sich auf diese konzentrieren und Pionierarbeit leisten, in der Folge kann es dann behaupten, der übrigen Welt „voraus" zu sein.

Um die Verwirrung etwas zu vermindern, ist es vielleicht gut, wenn wir kurz das Arbeitsprogramm einiger ausgewählter Länder betrachten und versuchen, unter Ausschaltung von Propaganda möglichst fair den Stand der Atomenergie in diesen Ländern festzustellen. Wir werden sehen, daß der Vergleich nicht durchweg quantitativ erfolgen kann, weil das Programm eines Landes in Hinsicht auf seine jeweiligen Erfordernisse beurteilt werden muß, die bei der Festsetzung der

Art des Programms entscheidend sein können. In Genf wurde am meisten die atomare Energiegewinnung, besonders beim gegenseitigen Vergleich der Länder, betont. Auch wir werden beim Vergleich der Programme unsere Aufmerksamkeit auf diesen wichtigen Punkt konzentrieren. Nachdem wir das Energieprogramm der Vereinigten Staaten in Kapitel 4 ziemlich vollständig behandelt haben, brauchen wir es nicht weiter zu beschreiben. Wir werden es aber mit den Fortschritten anderer Länder vergleichen, nachdem wir deren wichtigste Programmpunkte untersucht haben.

Wir wollen nun, nachdem seit der Genfer Konferenz etwa zwei Jahre vergangen sind und ihre Ergebnisse offensichtlich werden, den Fortschritt in einer Anzahl von Ländern betrachten. Es ist unmöglich, die Unternehmungen auch nur weniger Länder vollständig zu behandeln, sogar die Angabe der größeren Projekte wäre wahrscheinlich nicht lehrreich und sicherlich langweilig. Wir wollen vielmehr nur die wesentlichen Punkte im Atomprogramm der Länder betrachten, die Hauptdarsteller im Drama von der Atomenergie sind, und auch einiger ausgewählter kleinerer Länder, um ihre besonderen Aufgaben und Probleme deutlich zu machen. Die Auswahl wird etwas persönlicher Natur sein, weil es wünschenswert erscheint, daß der Beschreibung soweit wie möglich eigene Erfahrungen mit der Atomenergiearbeit dieser Länder und nicht gelesene Berichte zugrunde liegen. Auf einer Anzahl von Europareisen, die ich seit 1949 durchgeführt habe, bot sich mir durch Besuche in Laboratorien und Diskussionen mit Wissenschaftlern ausgezeichnete Gelegenheit, unmittelbar Auskunft über die Arbeit der meisten Länder zu erhalten.

Während und gleich nach dem akademischen Jahr 1953/54, das ich als Fulbright-Professor hauptsächlich in Oxford und Cambridge verbrachte, konnte ich mich insgesamt fast sechs Monate in den europäischen Atomenergielaboratorien informieren und Vorträge halten, in England und auf dem Kontinent, von Oslo bis hinunter nach Rom. Auf anderen Reisen vor und nach diesem Jahresaufenthalt konnte ich in mehreren Ländern genau den Gang der atomaren Entwicklung verfolgen. Der enge Kontakt mit so vielen Wissenschaftlern vermittelte mir ein gutes Bild der in Europa um 1954 herrschen-

den atomaren Situation und lebendige Eindrücke über ihre Hoffnungen und Gefühle gegenüber Amerika und Rußland. Der Kontakt mit diesen Wissenschaftlern wurde in Genf erneuert, hier lernte ich auch zum erstenmal unmittelbar durch sowjetische Wissenschaftler deren Arbeit kennen. Seit Genf habe ich mehrmals europäische Laboratorien besucht, so daß ich aus eigener Erfahrung über ihren derzeitigen Stand berichten kann. Die Fortschritte, Probleme und Wünsche der Länder, die ich am besten kenne, sind typisch für alle, so daß wir mit ihren Gegebenheiten auch weitgehend die anderer Länder erfassen werden.

In Dollar gemessen sind die Bemühungen des ganzen westlichen Europas zusammen viel geringer als die der Vereinigten Staaten. Trotz der begrenzten Größe sind die Programme äußerst tatkräftig und werden in einigen Ländern sehr schnell der praktischen Anwendung entgegengeführt, in mancher Hinsicht schneller als unser eigenes. Wie wir bereits festgestellt haben, folgt daraus nicht notwendig, daß jemand „vor" uns liegt. Wir werden sehen, daß das Programm jedes Landes hinsichtlich der Erfordernisse dieses Landes beurteilt werden muß und es daher äußerst schwierig ist, eine absolute Einschätzung der Programme vorzunehmen. In diesem Zusammenhang ist es interessant, daß der Großteil der europäischen Atomenergiearbeit, besonders in den kleineren Ländern, von Anfang an keinerlei Geheimhaltung unterworfen war. Diese Situation steht in deutlichem Gegensatz zu der in den Vereinigten Staaten, wo bis zur umfangreichen Freigabe für die Genfer Konferenz viele Forschungen über die Atomenergiegewinnung geheimgehalten wurden.

Großbritannien

Beim Versuch, einen einzelnen, charakteristischen Eindruck über die europäischen Bemühungen in der Zeit vor Genf zu vermitteln, fällt mir stets ein Gesichtspunkt ein, den mir Ende 1953 Professor F. E. Simon von der Oxford-Universität eindringlich darlegte. Es war eine Ansicht, die später sehr oft auch durch Wissenschaftler anderer Länder bekräftigt wurde. Stark beeindruckt von der Größe eines vollständigen Atom-

energieprogramms meinte er, daß ein solches sehr wohl über die wirtschaftliche Leistungsfähigkeit eines einzelnen europäischen Landes hinausgehen könnte. Er dachte an all die Schwierigkeiten der Gewinnung von Uranmetall und schwerem Wasser, der chemischen Abtrennung von Plutonium, der Anreicherung von Uran durch die Gasdiffusion, der Bombenherstellung und an die Grundlagenforschung, von der das alles abhängt. Die Aussicht auf den Aufbau einer vollständigen Atomenergieindustrie, die alle diese Elemente einschließt, in einem Land, dessen nichtatomare Industrie sich noch von den Kriegsfolgen erholen muß, kann einen wirklich zögern lassen.

In Anbetracht der Größe des Planes erscheint es logisch, daß ein einzelnes europäisches Land nicht versuchen sollte, ihn allein auszuführen. Besser erscheint es, mit anderen europäischen Ländern zusammenzuarbeiten oder sich bei der Lösung einiger dieser Probleme auf die Vereinigten Staaten zu stützen. Seit 1953 und insbesondere seit Genf hat sich eine Kompromißlösung herausgebildet, welche die Vorteile mehrerer Arten des Vorgehens in sich vereint. Die Länder des Kontinents arbeiten, wie wir sehen werden, im Euratom zusammen, bestimmte Länder wurden von den Vereinigten Staaten sehr unterstützt, und England geht seinen Weg weitgehend allein. Trotz der berechtigten Bedenken von Simon ist es für England sicher wünschenswert, möglichst alle Teilgebiete der Atomenergie, von Leitisotopen bis zu Bomben, zu entwickeln. Der wesentliche Grund für die englische Entscheidung, „wir wollen uns allein auf den Weg machen", war nicht nur das Fehlen eines Austausches von Informationen über industrielle Anwendungen der Atomenergie. Ein zusätzlicher und gewichtigerer Beweggrund war das bestimmte Gefühl, daß eine gesunde und starke englische Atomenergieindustrie nur dann entwickelt werden kann, wenn dieser für alle Gebiete Fachleute zur Verfügung stehen. Man kann natürlich schwer entscheiden, in welchem Maß bei diesen Beschlüssen der nationale Stolz eine Rolle spielt, aber die betrachteten Gründe bilden bei Berücksichtigung des letzteren Einflusses sicher die logische Grundlage der englischen Bemühungen. Das englische Programm ist hervorragend entworfen, um alle Teilgebiete der Atomenergie zu erfassen,

und zwar auf eine geplante, geordnete Weise, so daß möglichst bald praktische Resultate erzielt werden und gleichzeitig die Beherrschung des gesamten Gebietes fortschreitet, wenn auch langsam.

Untersucht man die verschiedenen Seiten der atomaren Bemühungen der Engländer, entweder an Hand der Berichte von Parlamentsdebatten oder unmittelbar von Ingenieuren, so zeigt sich, daß das Programm geordnet, gut aufeinander abgestimmt ist und schnell nützliche Ergebnisse liefert, nicht nur für militärische Anwendungen, sondern auch für die Erzeugung elektrischer Energie. Die im ganzen herrschende Ordnung überrascht etwas, wenn man sie vergleicht mit den vielen miteinander wetteifernden Reaktorprojekten in den Vereinigten Staaten, dem unterschiedlichen Schicksal verschiedener Reaktoren im Laufe der Zeit, den Debatten des Kongresses über manchmal ausgesprochen technische Angelegenheiten mit der ganzen damit verbundenen Propaganda, den Streitfragen über die richtige Art der Beteiligung der Industrie und der stets vorhandenen Sorge um die Sicherheit von Geheimnissen. Dieser zwischen dem englischen und amerikanischen Programm bestehende Unterschied hat wesentliche Gründe, nicht nur das englische Talent für geordnete Verwaltung und die größtenteils zivile Anstellung der Beschäftigten. Daß das ganze Programm besser aufeinander abgestimmt ist als das der Vereinigten Staaten, beruht zum Teil auf dem kleineren Umfang und der ausgedehnteren Verstaatlichung der Industrie; bei weitem der wichtigste Grund ist aber seine eindeutige, durch den Energiehunger Englands erzwungene Zielgebung. Die Notwendigkeit, die schwindenden Kohlenvorräte durch eine andere Energiequelle zu ersetzen, wird so dringlich werden, daß man zuverlässig sagen kann, daß England um die Jahrhundertwende einfach nicht mehr ohne die Erzeugung von Atomenergie auskommen würde. Trotz großer Anstrengungen, die inländische Kohlenförderung zu erhöhen, begann man mit dem Import von Kohle, der voraussichtlich zunehmen wird. Während es bis jetzt nicht richtig ist, daß Kohle nach Newcastle gebracht wird, so kommt sie doch zumindest nach England.

Der gegenwärtige Stand des Programms zeigt, daß die Eng-

länder die möglichst kurzfristige Energiegewinnung betonen. In Windscale sind zwei Plutonium erzeugende Reaktoren vom Hanford-Typ (obgleich luftgekühlt) in Betrieb, die einen Vorrat an spaltbarem Material für Bomben oder Leistungs-Brutreaktoren erzeugen. Der erste Leistungsreaktor wurde 1956 bei Calder Hall (Fig. 40, Tafel) in Betrieb genommen; seine Konstruktion ist nicht gerade fortschrittlich, aber er arbeitet eben bereits jetzt und zwar äußerst gut. Es handelt sich hier nicht um einen Reaktor mit Wasser unter großem Druck, flüssigen Metallen oder hoch angereicherten Brennstoffen, sondern um einen einfachen, natürlichen Uranreaktor mit Graphit als Bremsmittel. Durchaus „neu" ist nur die Verwendung von komprimiertem Gas (CO_2) als Kühlmittel, obgleich diese Methode (mit Stickstoff als Kühlmittel) schon seit einem Jahr in dem französischen Reaktor P2 in Saclay benützt wurde. Wegen der ihm eigenen verschiedenen unwirtschaftlichen Faktoren würde so ein einfacher Reaktor in den Vereinigten Staaten kaum ernsthaft als Leistungsreaktor in Betracht gezogen werden. Nichtsdestoweniger sind zwei dieser „altmodischen" Reaktoren heute in Calder Hall in Betrieb; sie erzeugen etwa 80 000 Kilowatt elektrische Leistung und ersetzen dadurch einen jährlichen Verbrauch von ungefähr 400 000 Tonnen Kohlen; mehrere andere befinden sich im Bau.

Gleichzeitig schreiten auch die weniger betonten Teile des Programms voran. 1954 betrieb man erstmals den „Zephyr", einen schnellen Nullenergie-Reaktor, als Brennstoff wird aus Windscale stammendes Plutonium benützt. In Schottland befindet sich ein Atomkraftwerk mit einem schnellen Reaktor und 10 000 Kilowatt Leistung im Bau. Das in Windscale anfallende verbrauchte Uran bleibt in dem Programm nicht unberücksichtigt, es wird in Capenhurst durch Gasdiffusion angereichert und dann wieder zu Brennstoff für die Windscale-Reaktoren verarbeitet. Außerdem hat man mit der Planung eines Druckwasser- (leichtes Wasser) Leistungsreaktors begonnen. Diese ineinandergreifenden Unternehmungen zeigen sehr deutlich, daß die möglichst baldige Energiegewinnung betont wird, die Wirtschaftlichkeit dabei eine geringere Rolle als in den Vereinigten Staaten spielt und auf längere Sicht eine möglichst wirksam zusammengefaßte Planung erfolgt.

Die Vorrangstellung, welche die Energiegewinnung in ortsfesten Anlagen in den Bestrebungen des englischen Programms einnimmt, ist offensichtlich, sie trägt dazu bei, der ganzen Unternehmung einen festen Zusammenhalt zu geben. Es gibt kein Nebeneinander von verschiedenen Zielen wie in den Vereinigten Staaten, in denen atomare Antriebsaggregate und ortsfeste Energieerzeugungsanlagen im Etat miteinander konkurrieren. Die derzeitige Folge ist, daß die Engländer heute Atomkraftwerke haben, die ziemlich viel elektrische Leistung erzeugen, während die Vereinigten Staaten bis jetzt im wesentlichen noch keine haben. Durch die reichlichen natürlichen Energiequellen in den Vereinigten Staaten entfällt auch die Dringlichkeit, und es besteht deshalb ein Widerstreben, einen bestimmten Leistungsreaktor zu bauen, bevor ausgedehnte Untersuchungen erwiesen haben, daß er der bestmögliche ist.

Die Parlamentsdebatten im Zusammenhang mit der Atomenergiegesetzgebung im Jahr 1953 zeigen gut die Ansicht der Engländer über ihre Brennstoffsituation und deren Beziehung zur Atomenergieerzeugung. Zum Beispiel übte Lord Falmouth im Oberhaus Kritik an dem Programm der Regierung, er legte dar, daß der Plan für den Bau eines 50 000 Kilowatt-Kraftwerkes (Calder Hall) mit einem Kostenaufwand von 6 Millionen englischen Pfund (Anm. des Übers.: ungefähr 70 Millionen DM) durch einen „weniger großartigen Plan" ersetzt werden sollte. Dieser Vorwurf der Übertriebenheit überrascht etwas, wenn wir diese 17 Millionen Dollar mit den 85 Millionen Dollar für das Kraftwerk der Vereinigten Staaten in Shippingport vergleichen. Lord Salisbury, der als Lord-Präsident der Ratsversammlung für die englische Atomenergie-Gesellschaft verantwortlich ist, antwortete mit einer ausführlichen Begründung des Programms. Er legte dar, daß die Erzeugung elektrischer Energie, eine lebenswichtige Angelegenheit für England und von großer Bedeutung in dem atomaren Programm, nicht wie früher von dem Wirtschaftsminister kontrolliert werden sollte und daher in eine neue gesetzliche Gesellschaft, die auch die Erzeugung von Kohle, Elektrizität und Gas kontrolliert, eingefügt wurde. Er erklärte, die rein militärischen Seiten der Atomenergie, also die Konstruktion und die Herstellung von Bomben, fielen nicht direkt

in den Zuständigkeitsbereich dieser Gesellschaft und sollten weiterhin im Tätigkeitsbereich des Wirtschaftsministeriums verbleiben.

Lord Salisburys Optimismus hinsichtlich der zukünftigen Gewinnung von Atomenergie in England wird deutlich durch seine Voraussage, daß „durch die Verwirklichung des in der Prüfung befindlichen Programms bis zum Jahr 2000 der Großteil der Elektrizität des Landes aus Atomenergie erzeugt wird". Lord Cherwell, der als Churchills Berater bis vor kurzem für das Programm verantwortlich war, und Professor Simon, Männer, die sehr gut die Probleme kennen, die zum Erreichen einer so günstigen Sachlage gelöst werden müssen, teilen diesen extremen Optimismus nicht. Beide stimmen aber überein, daß die atomare Erzeugung elektrischer Energie für England wesentlich ist und die größtmöglichen Anstrengungen, die eine starke Zusammenfassung der beschränkten Mittel notwendig machen, rechtfertigt.

Die Absicht, die Erzeugung elektrischer Energie voranzutreiben, bestimmt die englischen Pläne für die nächsten Jahre. Durch den erfolgreichen Betrieb des Calder Hall-Kraftwerkes ermutigt, kündigten die Engländer Anfang 1957 eine beschleunigte Entwicklung der atomaren Gewinnung elektrischer Energie an. Bis 1965 wollen sie eine Kapazität von 4 Millionen Kilowatt erreichen, gerade zweimal soviel als 1955 geschätzt wurde. Die auf diese Weise jährlich erzeugte Energiemenge würde bei den heutigen Verfahren ungefähr 13 Millionen Tonnen Kohle je Jahr erfordern, das sind etwa 6 Prozent der gesamten derzeitigen englischen Kohlenerzeugung.

Frankreich

Nachdem wir mit der allgemein bekannten Brennstoffknappheit in England mehr oder weniger vertraut sind, ist uns die Betonung der Energieerzeugung in dem dortigen atomaren Programm leicht verständlich. Über die Brennstoffsituation in Frankreich scheint man nicht annähernd soviel zu wissen. Ich war überrascht, in Diskussionen mit Wissenschaftlern in Saclay, dem französischen Atomenergielaboratorium nahe Paris, zu erfahren, daß ihrer Meinung nach die ato-

mare Erzeugung elektrischer Energie für Frankreich noch dringlicher ist als für England. Die in Frankreich erzeugte elektrische Leistung von etwa 4 Millionen Kilowatt wird ungefähr zu gleichen Teilen aus Kohle und Wasserkraft gewonnen, beide Energiequellen können kaum wesentlich erweitert werden. Die ernsthaft in Betracht gezogene Verwendung der Gezeiten zur Energiegewinnung würde keine sehr große Zunahme der verfügbaren Energiemenge ergeben, wäre teuer und auf lange Sicht nicht genügend zuverlässig.

Die atomare Forschung konzentriert sich auf die Umgebung des P 2, eines Reaktors, in dem als Bremsmittel schweres Wasser benützt wird und der wegen seiner besonders großen Neutronenintensität für die Forschung äußerst wertvoll ist. Wie bereits erwähnt, wird der Reaktor erfolgreich mit komprimiertem Gas (zuerst Stickstoff, aber später Kohlendioxyd) gekühlt, ein Verfahren, das man auch für den englischen Leistungsreaktor in Calder Hall benützt. Ein 40 000 Kilowatt- (Wärme-) Reaktor zur Plutoniumgewinnung arbeitet in Marcoule an der Rhone. Er ist luftgekühlt und erzeugt etwas elektrische Energie, aber nicht genügend, um den Bedarf des Reaktors selbst zu decken. Der Antrieb der zur Kühlung des Reaktors dienenden Gebläse erfordert viel elektrische Energie, etwas mehr als der Reaktor selbst erzeugt. Zwei weitere mit Kohlendioxyd gekühlte Reaktoren werden gegenwärtig ebenfalls in Marcoule gebaut, diese werden etwa 40 000 Kilowatt elektrische Leistung liefern.

Andere europäische Länder

Norwegen begann sehr früh auf dem Kernenergiegebiet zu arbeiten, wesentlich unterstützt wurde es dabei durch den Besitz einer sehr wichtigen Anlage zur Herstellung schweren Wassers. In Zusammenarbeit mit Holland, das Uran besitzt, stellte es einen Plan auf, der sehr gute Resultate zeitigte. Der Forschungsreaktor JEEP (Joint Establishment Experimental Pile) nahe Oslo wurde sehr schnell gebaut und 1952 in Betrieb genommen, seitdem arbeitet er ohne erhebliche Schwierigkeiten bei einer Leistung von etwa 300 Kilowatt. Um diesen Reaktor bildete sich eine besonders rührige For-

schungsgruppe, die sehr gut die gegenwärtige Zusammenarbeit unter den europäischen Kernwissenschaftlern zeigt. Ich erinnere mich, außer mit Leuten aus Holland, die sich an der Reaktorkonstruktion beteiligt hatten, mit Wissenschaftlern aus Frankreich, Jugoslawien und Indien gesprochen zu haben, die während meines Besuches in Oslo im Jahre 1954 alle an dem Reaktor arbeiteten. Die mit dem Forschungsreaktor erhaltenen Ergebnisse werden auch für die Planung eines neuen Reaktors in Norwegen benützt, möglicherweise eines, der große Mengen von Niederdruckdampf zur Verwendung in der Zellstoffindustrie erzeugt. Außerdem erfolgt die aktive Planung eines für den Schiffsantrieb bestimmten Reaktors.

Der schwedische Forschungsreaktor, inoffiziell SLEEP (Swedish Low Energy Experimental Pile) genannt, ist seit 1954 in Betrieb. Während seine Konstruktion ziemlich herkömmlich ist, als Bremsmittel wird schweres Wasser, als Brennstoff natürliches Uran verwendet, ist seine Unterbringung einzigartig, er ist unter einem Park in Stockholm in einem großen, aus dem Felsen herausgesprengten Raum gelegen. Diese Bauweise rührt nicht daher, daß die Schweden den Reaktor als äußerst gefährlich ansehen, sondern man findet sie in Schweden ziemlich häufig. Der Reaktor dient hauptsächlich dem Sammeln von Erfahrung in der Neutronenphysik. Gleichzeitig schreitet die eingehende Planung eines zweiten schwedischen Reaktors fort, eines Leistungsreaktors, der einige Kilometer von Stockholm entfernt errichtet werden soll.

In Holland treibt eine äußerst unternehmende Gruppe von Wissenschaftlern und Ingenieuren, die durch die Mitarbeit an dem Bau des norwegischen Reaktors Erfahrung gesammelt haben, die Pläne für einen Leistungsreaktor voran. Neutronen für die beim Entwerfen des Leistungsreaktors notwendigen Experimente wird ein in den Vereinigten Staaten gekaufter Versuchsreaktor liefern. Außerdem beschäftigen sich die holländischen Ingenieure in ihrem Forschungszentrum in Arnheim mit Reaktorentwürfen, die weit fortschrittlicher sind als irgendwelche in den Vereinigten Staaten diskutierte. Wegen ihrer Erfahrung im Umgang mit brei- und pulverförmigen Substanzen sind sie sehr darauf bedacht, einige der hierfür benützten Verfahren für den Transport des Uranbrennstoffes

durch den Reaktor zu verwenden. Diese Verfahren sind, gelinde gesagt, so ungewöhnlich wie die „Verflüssigung" pulverförmiger Substanzen durch Hindurchblasen von Gas. Sind sie aber erfolgreich, so vermeiden sie alle komplizierten Probleme der Schutzüberzüge und der Entfernung von Brennstoffelementen, die bei den gewöhnlichen Reaktoren mit festem Brennstoff auftreten. Dieser Versuch mit völlig neuen Verfahren in der Kernenergietechnik übt einen sehr gesunden Einfluß aus, trotz der begrenzten Erfahrung, welche die Holländer mit Reaktoren großer Leistung haben. Gerade von so kleinen Gruppen, die, weil sie nicht an große und meist herkömmliche Reaktorprojekte gebunden sind, völlig neue Wege gehen können, kommen manchmal neue Entwicklungen von großer Bedeutung.

In den anderen europäischen Ländern sind die Atomenergieprogramme bei weitem nicht so fortgeschritten wie in den bisher betrachteten Ländern. Nichtsdestoweniger wird in jedem Land hart gearbeitet von Gruppen, die in der Größe verschieden sind, aber übereinstimmen im Optimismus, der Begeisterung und der Ansicht, daß die Atomenergie ein unentbehrlicher Bestandteil der industriellen Zukunft ihres Landes ist. Die einzelnen Unternehmungen sind im Vergleich zu denen der Vereinigten Staaten winzig, aber gerade deshalb können neue Ideen in einer Weise untersucht werden, wie es in den Vereinigten Staaten kaum möglich ist. Zum Beispiel stellt eine kleine, unter Heisenberg in Göttingen arbeitende Gruppe versuchsmäßig Graphit her, dessen Dichte viel größer ist als die des in amerikanischen Reaktoren verwendeten Graphits. Die deutschen Wissenschaftler glauben auch, daß sie wirtschaftliche Verfahren zur Gewinnung von schwerem Wasser entwickeln können; man gewinnt ohne Zweifel den Eindruck, daß ihre Erfolgsaussichten sehr gut sind. Auch die Italiener und Franzosen arbeiten an der Gewinnung von schwerem Wasser, so daß das norwegische Monopol in Europa vielleicht nicht mehr lange bestehen wird.

Einen besonders interessanten Fall stellt Finnland dar, das auf Grund seiner Lage sowohl vom Osten als auch vom Westen stark beeinflußt wird. In dem von der finnischen Energiekommission (entspricht der AEC der Vereinigten Staaten)

derzeit betrachteten Kernenergieprogramm ist keine sofortige Planung eines Leistungsreaktors vorgesehen. Anscheinend zögern die Mitglieder, sich auf eine bestimmte Linie der Energieentwicklung festzulegen, noch viel weniger nehmen sie gegenwärtig eine Konstruktion in Angriff. Der Grund für dieses Zögern ist nicht ein Überfluß an Wasserenergie, denn trotz großer Mengen fließenden Wassers sind alle günstigen Plätze bereits ausgebaut. Auf der anderen Seite sind die Finnen daran interessiert, falls die Kosten gering sind, möglichst bald einen Reaktor zu erhalten, der für ihre riesige Zellstoffindustrie Dampf erzeugt. In dem Gefühl, daß Verbesserungen unvermeidlich sind und sie die Entwicklung besser größeren Ländern überlassen, haben sie aber vorläufig wenig Interesse an einem Leistungsreaktor für die Erzeugung elektrischer Energie.

Eine wichtige Rolle spielt die Angst der Finnen, daß sie, wenn ihnen die Durchführung eines vollständigen Programmes selbst nicht möglich ist, der Aufsicht eines der großen Länder unterliegen und dann von diesem abhängig sein werden. Ihre Zurückhaltung ist leicht verständlich, wenn man sich vergegenwärtigt, daß sie z. B. ihr gesamtes Öl aus dem Osten beziehen und die Sowjets, wenn sie wollen, diese Lieferung jeden Augenblick unterbrechen können. Aber die meisten amerikanischen Beobachter empfinden, daß eine derzeitige zu große Vorsicht die zukünftige Entwicklung des finnischen Atomprogramms aufhalten könnte. Finnland könnte gegenwärtig zwei wesentliche Schritte unternehmen: die Konstruktion eines oder mehrerer Forschungsreaktoren und die Ausbildung eines Stammes von Fachleuten im Ausland.

Sowjet-Union

Auf der Genfer Konferenz interessierte man sich natürlich stark für die Darlegung der Sowjets. Die von ihren Wissenschaftlern eingesandten Auszüge machten ihre Absicht deutlich, solide technische und wissenschaftliche Ausführungen, keine Propaganda, zu bringen und zu zeigen, daß sie bei der Erzeugung von Atomenergie bereits praktische Ergebnisse erzielt hatten. Der vorgesehene Bericht über ein atomares

Kraftwerk mit 5000 Kilowatt Leistung verursachte viele Vermutungen, darunter einige Voraussagen, daß der Bericht Propaganda sei und das Kraftwerk in Wirklichkeit nicht existieren würde. Doch der Bericht erwies sich von typisch wissenschaftlicher Art mit einer ungeheuren Fülle von ausführlichen Angaben über das Kraftwerk einschließlich Photographien des Reaktors und der elektrischen Anlagen. Es bestand also kein Zweifel über die Existenz der Anlage, die nach Angabe der Sowjets seit 1954 in Betrieb ist. Fig. 43 (Tafel) zeigt das eigentliche Reaktorgebäude. Als wir die Wissenschaftler über den etwas altmodischen Stil des Gebäudes fragten, erwiderten sie: „Nun, Sie wissen, wie Architekten sind — sie wünschten es so!" Tatsächlich — man hätte es zu diesem Zeitpunkt kaum für möglich gehalten — sahen amerikanische Wissenschaftler das Kraftwerk in Betrieb, als sie weniger als ein Jahr nach der Genfer Konferenz Rußland besuchten. Die vielen sonstigen Berichte der Sowjets zeigten, daß sie nicht nur ein Atomkraftwerk haben, sondern auch große Anlagen zur Isotopentrennung, mehrere Forschungsreaktoren, die ungefähr denen der Vereinigten Staaten gleichen und alle für diese großen Reaktoren erforderlichen Hilfseinrichtungen.

Das russische Atomkraftwerk ist ein gutes Beispiel dafür, wie schwierig es ist, im Rahmen des atomaren Wettbewerbs den relativen Stand verschiedener Nationen anzugeben. Die bloße Tatsache, daß die Russen seit 1954 ein Atomkraftwerk mit 5000 Kilowatt elektrischer Leistung betreiben, könnte den Anschein erwecken, daß sie allen Nationen voraus waren, die keine derartigen Kraftwerke besaßen. Bei einer gründlichen Betrachtung des relativen Standes muß außer den Daten der Inbetriebnahme auch die Art der Reaktorkonstruktion berücksichtigt werden. Das sowjetische Kraftwerk z. B. verwendet einen Reaktortyp, der in den Vereinigten Staaten als etwas überholt angesehen wird, denn man benützt als Bremsmittel Graphit, als Kühlmittel Wasser und als Brennstoff Uran, dessen U^{235}-Gehalt nur sehr wenig über den des natürlichen Urans angereichert ist. Dieser Reaktortyp wird auf dem Gebiet der Energieerzeugung in den Vereinigten Staaten nicht als ernstlich wettbewerbsfähig angesehen und würde dort kaum gebaut werden. Der Reaktor ist im wesentlichen von der

gleichen Art wie die 1943 in Hanford gebauten Plutonium erzeugenden Reaktoren, die, wie wir in Kapitel IV gesehen haben, für die Energiegewinnung schlecht geeignet sind. Wir haben in Kapitel IV behandelt, daß innerhalb des Programms der Vereinigten Staaten viele Arten von Reaktoren sehr gründlich untersucht werden, aber nur einige der aussichtsreichsten wirklich gebaut werden sollen. Das bedeutet, daß in den Vereinigten Staaten wahrscheinlich *kein* Reaktor gebaut werden wird, bevor er und viele mit ihm konkurrierende Reaktoren nicht so gründlich entwickelt sind, daß alle Einzelheiten ihres Betriebes erfaßt wurden.

Das sowjetische Programm ähnelt mehr dem Englands als dem der Vereinigten Staaten, weil, wie wir gerade gesehen haben, in Calder Hall ein Reaktortyp gebaut wurde, der dem russischen etwas ähnlich ist. Während man in England wegen der Brennstoffknappheit schnell einen wenn auch ziemlich altmodischen Reaktor baute, ist es nicht klar, ob das sowjetische Kraftwerk wegen einer tatsächlichen Energieknappheit so früh gebaut wurde, oder einfach aus dem Verlangen, in Rußland das erste Atomkraftwerk der Welt zu bauen. Natürlich muß das Atomenergieprogramm auf das jeweilige Land abgestimmt sein; in Anbetracht der vielen veränderlichen Faktoren ist die Wahl des richtigen Programmes schwierig. Sogar in den Vereinigten Staaten, wo genügend Geld verfügbar ist, um viele Reaktortypen zu bauen, ist, wie wir im nächsten Kapitel sehen werden, die Art des Vorgehens noch stark umstritten.

Die Sowjets bauten nicht nur ihren ersten Leistungsreaktor, der eine etwas geringe Kapazität und einen ziemlich schlechten Wirkungsgrad hat, sondern schritten auch in der Entwicklung anderer Reaktortypen rasch voran. Einige ziemlich ausführliche, in Genf vorgelegte Berichte zeigten deutlich, daß sie sich mit der Entwicklung eines schnellen Reaktors befassen, der, wie wir in Kapitel IV gesehen haben, für das Brüten sehr aussichtsreich ist. Auch andere Typen werden geplant, die Merkmale wie schweres Wasser als Bremsmittel, Gaskühlung, homogene Reaktorkerne und siedendes Wasser aufweisen; das sind praktisch alle Typen, die auch in den Vereinigten Staaten untersucht werden. Als die Sowjets in Genf über ihren

in Betrieb befindlichen Leistungsreaktor berichteten, wurde von amerikanischen Wissenschaftlern darauf hingewiesen, daß das *Umwandlungsverhältnis* (Zahl der Plutoniumatome, die je Spaltung eines Uranatoms entstehen, wie in Kapitel IV diskutiert) äußerst klein ist, viel kleiner als die Umwandlungsverhältnisse der in den Vereinigten Staaten untersuchten Typen von Leistungsreaktoren. Obwohl die russischen Wissenschaftler von den Umwandlungsverhältnissen, die für die in den Vereinigten Staaten geplanten Reaktoren angegeben wurden, offensichtlich stark beeindruckt waren, wiesen sie natürlich gleich darauf hin, daß *ihr* Reaktor tatsächlich arbeitet und sie für die noch auf dem Reißbrett befindlichen Reaktoren auch höhere Umwandlungsverhältnisse erreichen wollen.

Es ist kaum anzunehmen, daß im Rahmen des russischen Energieprogramms noch viele Reaktoren von der gleichen Art wie der erste in Betrieb genommene Leistungsreaktor gebaut werden. Nahezu sicher werden ihre nächsten Reaktoren fortschrittlicherer Art sein, ähnlich den Reaktoren, die gegenwärtig in den Vereinigten Staaten gebaut werden. Zusätzliche Auskunft über die sowjetischen Pläne gab ein im April 1956 in Harwell, dem englischen Laboratorium, von Kurchatow, einem russischen Ingenieur, gehaltener ausführlicher Vortrag. Er erklärte, daß die Sowjets bis 1960 etwa 500 000 Kilowatt elektrische Leistung aus Atomenergie erzeugen wollen, dabei werden drei verschiedene Reaktortypen eingesetzt. Diese Reaktoren sollen alle in den Ebenen des europäischen Rußland, wo Brennstoff knapp ist, errichtet werden, nicht in Sibirien, wo billige, mit Wasserkraft erzeugte elektrische Energie reichlich vorhanden ist. Im Herbst 1956 wurde jedoch in einer sowjetischen Verlautbarung angegeben, daß diese Pläne auf die Erzeugung von 2 Millionen Kilowatt bis zum Jahre 1960 ausgedehnt werden sollen. Das entspricht etwa der zwei- oder dreifachen atomaren Leistungskapazität, die in England oder den Vereinigten Staaten (jeweils etwa 1 Million Kilowatt) bis ungefähr zur gleichen Zeit, 1960/61, geplant ist. Dieses Ziel ist äußerst ehrgeizig, wenn man die Zeit berücksichtigt, die zwischen dem ersten Entwurf und dem schließlichen Bau einer so großen und verwickelten industriellen Anlage, wie sie ein moderner Reaktor darstellt, liegt.

Die Größe des Programms zeigt deutlich, daß die Sowjets sich sehr um die erfolgreiche Gewinnung von Atomenergie bemühen. Die Fähigkeiten vieler Wissenschaftler werden offensichtlich diesem Zweck gewidmet. In Genf wurde uns klar, daß ein großer Teil des sowjetischen Programms, sogar wenn es sich um grundlegende Dinge handelt, letztlich der erfolgreichen Durchführung des Leistungsreaktorprogramms dient. Zum Beispiel konzentrierten sich die Wissenschaftler, die Wirkungsquerschnitte gemessen haben, offensichtlich mehr auf die für das Reaktorprogramm wichtigen Kerne als auf die für die Grundlagenphysik sehr bedeutsamen Kerne. In dieser Hinsicht scheint sich die Haltung der Wissenschaftler Rußlands und der Vereinigten Staaten wesentlich zu unterscheiden. Die letzteren waren, obwohl sie an einer Konferenz „Atome für den Frieden" teilnahmen, viel mehr als die Sowjets daran interessiert, in welchen Beziehungen ihre Ergebnisse zu den Grundlagen der Kerntheorie stehen. Leider können wir hier nicht auf die komplizierte Frage eingehen, inwieweit diese Koppelung von Grundlagenforschung und Anwendungen vorteilhaft ist. Als ein wichtiger Gesichtspunkt kann angeführt werden, daß Ergebnisse für die nahe Zukunft auf diese Weise wahrscheinlich schneller erreicht werden, ein Land aber geschädigt wird hinsichtlich der Erlangung grundlegender Ergebnisse, die Jahre später von großem praktischen Wert sein werden.

Die relative Stellung der Vereinigten Staaten

Obgleich wir bereits davon sprachen, was für ein Kurs in den Vereinigten Staaten hinsichtlich der Erzeugung von atomarer Energie verfolgt wird, ist es doch gut, wenn wir einige Punkte des Programms mit gleichlaufenden Entwicklungen in anderen Ländern vergleichen. Wie wir in Kapitel IV sahen, ist das Programm der Vereinigten Staaten wegen der reichlich vorhandenen natürlichen Brennstoffe mehr auf fortschrittliche Reaktoren ausgerichtet, die mit den „fossilen Brennstoffen" Kohle, Gas und Öl, die in den Vereinigten Staaten relativ billig sind, konkurrieren können. Wegen der Notwendigkeit

dieses Wettbewerbs hat es sehr wenig Zweck, Reaktoren zu untersuchen oder zu bauen, wenn die erzeugte elektrische Energie teurer sein wird als bei Verwendung von üblichen Brennstoffen. Das ist der Grund, warum sich die Vereinigten Staaten nicht wesentlich bemüht haben, Reaktoren zu entwerfen oder zu bauen, in denen als Bremsmittel Graphit und als Brennstoff natürliches oder schwach angereichertes Uran verwendet wird. Wie wir gerade gesehen haben, sind solche Reaktoren in England und Rußland gebaut worden. Jedoch werden diese Reaktoren wegen ihres kleinen Umwandlungsverhältnisses (geringe Plutoniumerzeugung) und des infolge der niedrigen Temperatur schlechten Wirkungsgrades der Umformung von Wärme in elektrische Energie in den Vereinigten Staaten nicht als Vorbilder angesehen.

Eine unvermeidliche Folge der fortschrittlichen Natur der in den Vereinigten Staaten betrachteten Reaktoren ist, daß ihre Fertigstellung bedeutend mehr Zeit erfordert. Zum Entwerfen und Bauen eines guten Brutreaktors braucht man viele Jahre länger als für einen Reaktor, in dem gewöhnliches Uran und natürlicher Graphit verwendet werden und der deshalb ein äußerst kleines Umwandlungsverhältnis hat. Der letztere Reaktortyp arbeitet zuverlässig, in einer Weise, die sich äußerst weitgehend voraussagen läßt, und erzeugt auch eine Menge Elektrizität, aber er verbraucht auch viel wertvolles U^{235} und kostet deshalb viel mehr Geld als ein guter Brutreaktor.

Es besteht natürlich die Gefahr, daß der Wunsch nach einem wirtschaftlichen Reaktor übertrieben wird, indem kein Reaktor gebaut wird, weil man vielleicht nach einigem Warten einen noch besseren Reaktor bauen könnte. Tatsächlich hätte das Programm der Vereinigten Staaten im Reaktorbau schneller praktische Resultate erzielt, wenn wir nicht immer das Ziel des Brütens mit hohem Wirkungsgrad und geringen Kosten vor Augen gehabt hätten. Einige Leute sind in der Tat der Ansicht, daß wir auf lange Sicht schneller vorankommen könnten, wenn wir dazu übergingen, ohne Rücksicht auf Kosten und Wirkungsgrad Reaktoren zu bauen. Ein solcher Einwand ist aber mit einer Menge weiterer Vermutungen verbunden, und es ist keineswegs sicher, ob das von uns durch-

geführte Programm das beste ist, oder ob ein berechtigter Grund zur Kritik vorhanden ist. Natürlich ist weder das Extrem, zu bauen was gebaut werden kann, noch das Extrem, unbestimmte Zeit zu warten, bis wir den besten Reaktor haben, vernünftig; das richtige Programm liegt offensichtlich irgendwo zwischen diesen beiden unvernünftigen Extremen.

Wenn wir also den etwas aufrüttelnden Zeitungsbericht lesen, daß England ein atomares Kraftwerk betreibt und in der Welt führend ist, weil es mehr atomare Kilowatt erzeugt als irgendein anderes Land, oder daß Rußland seit 1954 eine 5000-Kilowatt-Anlage in Betrieb hat, dann dürfen wir als Reaktion darauf nicht in eines der beiden Extreme verfallen. Es stimmt *nicht*, daß die Vereinigten Staaten hinter diesen Ländern zurückliegen, weil sie gegenwärtig nicht x-tausend Kilowatt erzeugen. Andererseits stimmt es auch nicht, daß die Ergebnisse dieser Länder unwesentlich sind, weil wir uns für fortschrittlichere Reaktoren interessieren. Der Erfolg eines Atomenergieprogrammes muß stets an den Bedürfnissen des Landes gemessen werden, in dem es zur Ausführung gelangt. Das Programm Englands eignet sich für dessen Bedürfnisse sicher ausgezeichnet, aber es ist augenfällig *nicht* geeignet für die Vereinigten Staaten.

Die Möglichkeit eines ziemlich absoluten Vergleichs der Fortschritte verschiedener Länder in der Entwicklung von Atomenergieanlagen könnte sich durch Zugrundelegen des Wettbewerbs ergeben, der auf dem Markt herrscht, den die am Kauf von Reaktoren interessierten Länder bilden. Dieser Markt ist heute kaum belebt, wird es aber sicher in naher Zukunft sein. Man könnte somit sagen, daß das Land seinen Konkurrenten voraus ist, welches in einigen Jahren für den allgemeinen Bedarf in vielen Ländern den leistungsfähigsten Reaktor herstellen wird. Zur Beurteilung müßte man also untersuchen, welche Reaktoren die Länder der Welt im Verlaufe mehrerer Jahre für ihren eigenen Bedarf kaufen. Wir sind aber noch nicht ganz so weit, daß Reaktoren auf dem freien Markt verkauft werden; wir nähern uns allerdings diesem Zustand rasch, wenn wir nach der lebhaften Verkaufsreklame der Firmen der Atomenergieindustrie in Genf urteilen. Wir müssen noch etwas warten, um mit dieser Methode bestim-

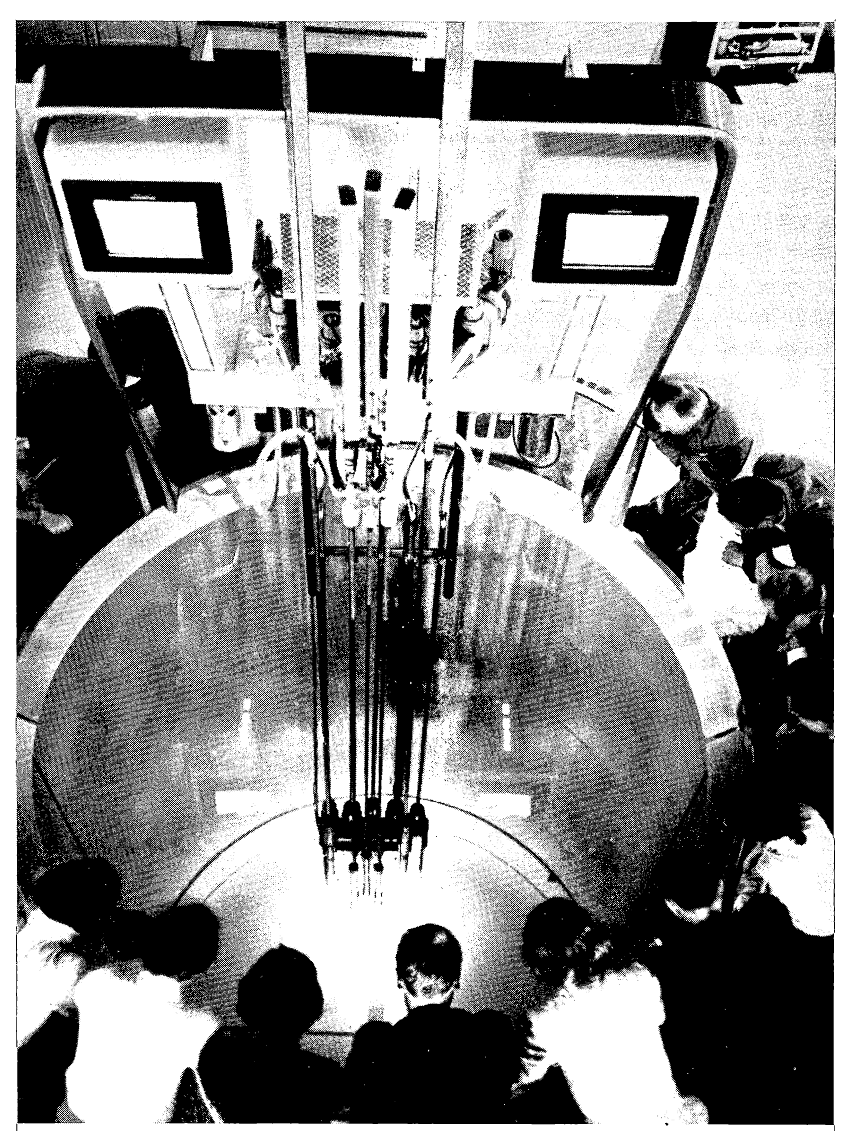


Fig. 42. Der in Genf von den Vereinigten Staaten aufgebaute „Schwimmbad-Reaktor. Der Reaktor wird jetzt in Zürich betrieben (Union Carbide Corporation).

Fig. 43. Das Hauptgebäude des russischen Atomkraftwerks, das 1954 in Betrieb genommen wurde und 5000 Kilowatt elektrische Leistung erzeugt (I. I. Noviko, Moskau, UdSSR).

Fig 44. Der Gebrauch von Schutzkleidung bei der Arbeit am Reaktor in Brookhaven. Obgleich der Reaktor bei der Arbeit nicht in Betrieb ist, ist wegen der in ihm enthaltenen großen Mengen radioaktiver Stoffe äußerste Vorsicht notwendig.

men zu können, welches Land im Atomenergierennen an der Spitze liegt.

Für die Zwischenzeit ist es sehr günstig, daß die internationale Zusammenarbeit so gut entwickelt ist, daß sich die Länder gegenseitig helfen können, auch wenn ihre Ziele nicht genau übereinstimmen. Die Ausbreitung dieser materiellen Hilfe über die nationalen Grenzen stellt eine ermutigende Geschichte der internationalen Zusammenarbeit dar, die sehr wohl als anregendes Beispiel für ähnliche Unternehmungen auf anderen Gebieten dienen kann. Deshalb wollen wir unsere Geschichte des internationalen Atoms beschließen mit einem Bericht über die internationale Organisation zur Zusammenarbeit auf dem Gebiet der Atomenergie, die nach mehrjähriger Planung entsprechend Präsident Eisenhowers ursprünglichem, auf den Rat des AEC-Vorsitzenden Strauss zurückgehenden Vorschlag verwirklicht wurde.

Die internationale Atomenergiebehörde

Unmittelbar nach Eisenhowers Vorschlag vor den Vereinten Nationen im Dezember 1953 schritten die Angelegenheiten der internationalen Atomenergie ziemlich langsam voran, trotzdem war etwa ein Jahr später klar, daß das Verlangen nach einer internationalen Zusammenarbeit so groß ist, daß irgendeine Form der Organisation nahezu unvermeidlich war. Die Vollversammlung der Vereinten Nationen billigte am 4. Dezember 1954 — um diese Zeit stand ziemlich fest, daß die Genfer Konferenz stattfinden würde — einmütig eine Resolution, welche die Bildung einer internationalen Behörde für die Verwertung der Atomenergie im Frieden verlangte. Die sowjetischen Delegierten stimmten für die Resolution, obwohl sie versucht hatten, nur um bei diesen Bestrebungen ein Veto einlegen zu können, die Behörde unter die Kontrolle des Sicherheitsrates zu bringen.

Henry Cabot Lodge, der Delegierte der Vereinigten Staaten, hatte am 15. November, kurz vor der einmütigen Billigung durch die Vollversammlung, bekanntgegeben, daß die Vereinigten Staaten für den Bedarf anderer Länder 100 Kilo U^{235}

bereitgestellt haben. Am nächsten Tag bot die englische Delegation an, für die internationale Behörde 20 Kilo U^{235} beizusteuern. Die von Lodge gemachte Ankündigung war einer der von den Vereinigten Staaten unternommenen Schritte, die zeigen sollten, daß sie bereit waren, sich an der internationalen Zusammenarbeit zu beteiligen, auch wenn die Sowjets nicht teilnehmen würden. Außenminister Dulles umriß in seiner Rede bei der Eröffnung der Vollversammlung am 24. September 1954 mehrere Schritte, welche die Vereinigten Staaten unternehmen wollten, so z. B. die Einberufung einer internationalen Konferenz, die Eröffnung einer Schule für die Reaktorausbildung und die Einladung einer Anzahl von Krebsfachleuten zu einem Besuch in den Vereinigten Staaten.

Die Grundlage einer internationalen Behörde wurde also bereits vor der ausführlichen Planung der Genfer Konferenz gebilligt. Außerdem zeigten die verschiedenen Angebote der Vereinigten Staaten deutlich, daß, wenn innerhalb angemessener Zeit keine internationale Organisation zustande kommt, die Zusammenarbeit zwischen den Nationen auf zweiseitiger Grundlage durchgeführt werden wird. Nach der Annahme durch die Vollversammlung entwickelten sich die Ereignisse etwas schneller; im April 1955 gaben die Vereinigten Staaten bekannt, daß sie einen Vertragsentwurf ausgearbeitet und an sieben Länder geschickt hätten, die dazu Stellung nehmen sollten. Die selbständigen Schritte der Vereinigten Staaten wurden fortgesetzt; Präsident Eisenhower bot in einer Rede am 11. Juni 1955 anderen Ländern Forschungsreaktoren und Brennstoff an, wobei die Vereinigten Staaten die Hälfte der Kosten tragen würden. Im Sommer 1955 verdoppelten die Vereinigten Staaten die Menge des Materials, das sie der internationalen Behörde bereits im vergangenen Herbst zur Verfügung gestellt hatten, um diese Zeit wurden auch mit einer Reihe von Nationen zweiseitige Abkommen geschlossen.

Nach der sehr erfolgreichen Genfer Konferenz „Atome für den Frieden" im August 1955 schritt die Bildung der internationalen Behörde weiter voran. Eine Gruppe von acht Nationen legte der UN-Vollversammlung Anfang Oktober einen Satzungsentwurf der Behörde vor. Dieser wurde gut aufgenommen, und die Vollversammlung nahm noch im gleichen

Monat einmütig eine Kompromißform dieser Satzung an, die nur geringe Abänderungen enthielt. Im einzelnen begann der Aufbau der Gesellschaft, als im Februar 1956 ein Vorbereitungsausschuß mit zwölf Mitgliedern in Washington seine Arbeit aufnahm. Dieser Ausschuß konnte seine Arbeit schnell beenden und nahm den Satzungstext am 18. April einmütig an. Die Nationen, deren Vertreter diese bedeutende Aufgabe durchführten, waren die Vereinigten Staaten, die Sowjet-Union, England, Frankreich, Kanada, Australien, Belgien, Brasilien, die Tschechoslowakei, Indien, Portugal und Südafrika.

Auf einer besonderen, im Herbst 1956 im Gebäude der Vereinten Nationen in New York abgehaltenen Konferenz wurde der Plan für die Behörde 82 möglichen Mitgliedern der internationalen Organisation vorgelegt. Die 82 Nationen begannen ihre Konferenz am 20. September und hatten nach einmonatiger Debatte, die sich meistens auf hohem Niveau befand und nur selten scharfe Formen annahm, den Plan für die Behörde vervollständigt, Übereinstimmung erreicht und die endgültige Satzung am 23. Oktober unterzeichnet. Die tatsächliche Existenz der Behörde setzt die Ratifizierung der Satzung durch 18 Staaten voraus. Die Tätigkeit der Behörde, die offiziell als Internationale Atomenergiebehörde bezeichnet wird, wurde nicht in allen Einzelheiten festgelegt, aber es wurden Vorkehrungen getroffen, daß sie das für die verschiedenen Mitglieder der Behörde zur Verfügung stehende spaltbare Material verwalten kann. Sie kann auch bei der Einrichtung von atomaren Anlagen helfen und die Sicherheitsvorkehrungen für Reaktoren auf der ganzen Welt überwachen. Die Tätigkeit der Behörde wird durch einen Ausschuß von Direktoren geleitet werden, in dem die zwölf Nationen vertreten sind, die im Frühling 1956 in Washington die vorläufige Satzung ausarbeiteten. In der UN-Konferenz vom Oktober wurden in diesen Ausschuß von Direktoren weitere sechs Nationen gewählt: Argentinien, Japan, Ägypten, Peru, Indonesien und Pakistan. Zur Zeit der Annahme der endgültigen Satzung wurde Präsident Eisenhower, der in seiner Rede vor der Vollversammlung im Dezember 1953 die Bildung einer Behörde vorgeschlagen hatte, von vielen Abgeordneten großes Lob zuteil.

Größere, bei den UN-Debatten auftauchende Schwierigkeiten hatten hauptsächlich damit zu tun, wie vermieden werden kann, daß die Behörde unbeabsichtigt einzelne Nationen bei der Herstellung von Atombomben unterstützt. Es war klar, daß es keine einfache, praktische Methode gibt, die gewährleistet, daß einzelne Nationen ihre Kenntnisse nicht für militärische Zwecke verwenden, doch man erkannte deutlich, daß diese Möglichkeit der Verbreitung der nützlichen Anwendungen der Atomenergie nicht im Wege stehen darf. Die Vertreter der Sowjet-Union und Indiens waren etwas enttäuscht über das Fehlen des kommunistischen Chinas bei der Konferenz und in der Behörde. Diese Einwände verhinderten aber nicht die einmütige Annahme durch die 82 Nationen — ein denkwürdiges Beispiel der heute für die Atomenergie charakteristischen engen Zusammenarbeit und auch ein bedeutsamer Hoffnungsstrahl, daß man in Zukunft auf der ganzen Welt zu Verständigung und Vertrauen gelangt. Die Sowjet-Union war die erste Nation, die im Februar 1957 die Satzung der Behörde ratifizierte.

Bis heute helfen die Vereinigten Staaten ebenso wie andere Nationen einzelnen Ländern auf der Grundlage von zweiseitigen Verträgen, oder sie arbeiten mit ganzen Gruppen von Ländern zusammen. So beabsichtigen die Vereinigten Staaten den Staaten des Colombo-Plans zu helfen, indem sie ein asiatisches Zentrum für Kernforschung unterstützen, das in Manila errichtet werden soll. Die Vereinigten Staaten organisierten auch eine amerikanische Konferenz über die friedlichen Anwendungen der Atomenergie, die im März 1957 im Brookhaven-Laboratorium auf Long Island abgehalten wurde; diese Konferenz ähnelte der in Genf, war aber kleiner gehalten. Die europäischen Staaten vereinigen ihre Bemühungen in der mit Euratom bezeichneten Organisation, die ihnen z. B. den Bau der Anlagen für die Wiederaufbereitung von Brennstoffen ermöglicht, deren Errichtung für ein einzelnes Land äußerst kostspielig sein würde.

Es ist noch nicht klar, wie diese von der internationalen Behörde unabhängigen Unternehmungen in die der Behörde eingeordnet werden können, wenn diese ihre Tätigkeit aufnimmt. Es scheint aber sehr wahrscheinlich, daß die Vereinigten Staa-

ten diese Unternehmungen ganz der internationalen Behörde übertragen wollen. Jedenfalls besteht kein Zweifel, gleich, ob es sich um eine zweiseitige oder internationale Art der Zusammenarbeit handelt, daß die friedlichen Anwendungen der Atomenergie schnell einer weltweiten Verwirklichung entgegengehen. Der Austausch von Berichten und Wissenschaftlern zwischen Ost und West vertieft die in Genf hergestellten Beziehungen, Resultate werden heute weitgehend veröffentlicht.

VIII

STRAHLENSCHUTZ, NATIONALE SICHERHEIT UND DIE AEC

> Wir müssen weniger an das Vermeiden der Gefahren und mehr an das Gute denken, das wir erlangen werden, wenn wir daran glauben können, und es unsere Gedanken beherrschen lassen.
>
> Bertrand Russel
> *in J. B. Newman, ed., What is Science? (Simon and Schuster, New York, 1955)*

Hauptverantwortlich für die vielen Gebiete der Atomenergieentwicklung, gleich, ob sie der Zerstörung oder dem Nutzen dienen, ist in den Vereinigten Staaten die Atomenergiekommission. Sie sieht sich der weitgespannten und schwierigen Aufgabe gegenüber, die praktische Verwirklichung der Vorteile zu beschleunigen und dabei möglichen Schaden zu vermeiden. Obgleich sich viele staatliche und nichtstaatliche Einrichtungen mit den Teilgebieten der Atomenergie befassen, erfüllt die Atomenergiekommission in fast allen Bereichen wichtige Aufgaben.

Wir beschäftigten uns in diesem Buch bisher fast ausschließlich mit dem gegenwärtigen und zukünftigen Nutzen der Atomenergie, wir dürfen aber nicht vergessen, daß mit den großen Versprechungen dieses neuen Faktors in unserem Leben auch Gefahren einhergehen. Wir denken hier weniger an die offene Gefahr eines Atomkrieges als vielmehr an Schäden, die in engem Zusammenhang mit der friedlichen Verwendung der Atomenergie stehen. Die Gefahr eines Atomkrieges ist mit all den verwickelten Geschehnissen der Weltpolitik verbunden, geht also über technische Fragen weit hinaus. Das wesentliche Problem der militärischen Anwendungen der Atomenergie liegt in der Vermeidung eines Krieges, besonders eines Atomkrieges, und nicht in technischen Angelegen-

heiten der Atomenergie. Die weitgehenden Probleme der atomaren Abrüstung werden von den obersten Regierungsorganen — dem State Department und den Delegierten der Vereinigten Staaten in den Vereinten Nationen — wahrgenommen. Aber die Atomenergiekommission spielt auch in diesem weiten Rahmen eine wichtige Rolle, denn sie muß die betreffenden Stellen technisch beraten und dabei auch oft die Politik streifen.

Bei der Betrachtung der verschiedenen Gefahren der Atomenergie und dessen, was wir zu ihrer Verhütung unternommen haben und noch unternehmen müssen, untersuchen wir zuerst die schädlichen Wirkungen der Strahlung. Es handelt sich um die auf lebendes Gewebe ausgeübten Wirkungen; der Ursprung der Strahlung, ob diese von Kernreaktoren, der Explosion von Bomben zu Versuchszwecken oder im Krieg herrührt, spielt dabei keine Rolle. Wir werden sehen, welche Schritte man unternimmt, um die mit den friedlichen Anwendungen der Atomenergie verbundenen Gefahren möglichst zu verringern. Als nächstes werden wir uns einer anderen Art der Sicherheit zuwenden, einer ebenfalls bedeutsamen Aufgabe der AEC, dem Schutz unseres Programms gegenüber möglichen Feinden — mit anderen Worten: der Sache der Landessicherheit. Hier erhebt sich die wesentliche Frage, auf welchen Wegen die Landessicherheit erreicht werden kann, ob wir unseren Vorsprung gegenüber den anderen Ländern durch möglichst schnelle Weiterentwicklung oder durch weitgehende Geheimhaltung unserer Arbeit bewahren werden; beide Wege verlaufen in gewissem Ausmaß gerade entgegengesetzt.

Schließlich werden wir am Schluß des Kapitels behandeln, wie die Atomenergiekommission der Vereinigten Staaten in den etwa 10 Jahren ihres Bestehens versucht hat, diese schwierigen Probleme zu lösen. Der Aufbau der Kommission und ihre Unternehmungen sind für jeden Bürger sehr wichtig, denn es liegt an der Atomenergiekommission, ob die vom amerikanischen Volk für die Atomenergie angelegten ungeheuren Geldsummen richtig oder falsch ausgegeben werden. Wir alle haben also die eindeutige Pflicht, sorgfältig zu prüfen, in welcher Weise die Atomenergiekommission das ihr anver-

traute Geld benützt, um so einsichtige Entscheidungen über den zukünftigen Weg der Kommission treffen zu können. Auf diese Weise werden wir die Zukunft der Atomenergie nicht nur in Amerika, sondern auch in weitem Maß auf der ganzen Welt bestimmen.

Die Gefahren der Strahlung

Die Vorgänge, die den Wirkungen zugrunde liegen, welche die bei Kernprozessen entstehende Strahlung bei Lebewesen hervorruft, sind dieselben, ob die Strahlung nun auf ein atomares Kraftwerk oder den radioaktiven Niederschlag einer Bombenexplosion zurückgeht. Das Ausmaß der erzeugten Wirkungen kann zwar in beiden Fällen ungeheuer verschieden sein, aber die zugrunde liegenden Erscheinungen sind die gleichen. Wir beabsichtigen nicht, hier im einzelnen zu behandeln, wie A-Bomben, H-Bomben und ihre Abarten solch hohe Strahlungsintensitäten erzeugen. Die Strahlen sind die gleichen wie die im Zusammenhang mit den nützlichen Anwendungen der Kettenreaktion beschriebenen, also Alpha-, Beta-, Gammastrahlen und Neutronen.

In Verbindung mit den Gefahren der Atomenergie interessieren wir uns dafür, wie lebendes Gewebe beim Durchgang von Strahlung verändert wird. Die Intensität der Strahlung kann so gering sein, daß lebendes Gewebe praktisch nicht beeinflußt wird. So sind bei den Leitisotopen die verwendeten Mengen radioaktiver Substanz so klein, daß die Strahlung keine schädlichen Wirkungen hervorruft — ein wesentlicher Grund für die Nützlichkeit der Leitisotope. Wir wollen jetzt die schädlichen Wirkungen großer Strahlungsintensitäten untersuchen.

Dringt Strahlung in lebendes Gewebe ein, so erzeugt sie zunächst die gleiche Wirkung wie beim Eindringen in die Gasfüllung eines Geigerzählrohres. In beiden Fällen werden Atomen unter dem Einfluß der Strahlung Elektronen entrissen und damit elektrisch geladene *Ionen* erzeugt. Im Geigerzählrohr verursacht die Ionisation einen zum Nachweis der Strahlung benützten elektrischen Impuls, im lebenden Ge-

webe eine chemische Veränderung des Zelleninhalts. In der Folge kann die Zelle absterben oder, was möglicherweise viel schwerwiegender ist, sich wesentlich anders verhalten als eine normale Zelle.

Die durch Strahlung verursachten Veränderungen einer lebenden Zelle gehen auf eine Änderung der Elektronenstruktur der in der Zelle enthaltenen Atome zurück. Teilchen mit einer elektrischen Ladung ionisieren wegen der starken Wechselwirkung mit Elektronen wesentlich stärker als ungeladene Teilchen oder eine Wellenstrahlung, die beide geladene Teilchen großer Geschwindigkeit erzeugen, die ihrerseits erst die eigentliche Ionisation hervorrufen. So erzeugen Neutronen und Gammastrahlen, die beide keine elektrische Ladung haben, bedeutend weniger Ionen als Beta- oder Alphastrahlen. Die geladenen Teilchen selbst unterscheiden sich sehr in der Stärke der Ionisation, die sie hervorrufen, also in der je Zentimeter Weg erzeugten Zahl von Ionen; z. B. ist diese Zahl für ein Alphateilchen bedeutend größer als für ein Betateilchen; die Wirkung auf die Zelle beruht aber auf den gleichen Erscheinungen, nur der Grad der Wirkung kann sehr verschieden sein. Die unmittelbarste Folge der erzeugten Veränderungen der Elektronenstruktur der in der Zelle enthaltenen Atome ist das Absterben dieser Zelle, das man sich bei der Strahlenbehandlung des Krebses zunutze macht. Wesentlich ist dabei, daß die Bestrahlung der Krebszellen die gesunden Zellen möglichst wenig schädigt. Wie wir bereits gesehen haben, kann dies dadurch erreicht werden, daß man das Radioisotop möglichst nur in der Nähe der Krebszellen anbringt.

Beim planmäßigen Gebrauch von Strahlung zur Zerstörung krebskranken Gewebes finden die gleichen Vorgänge statt wie bei der Zerstörung von Gewebe durch radioaktive Strahlung, die von der Explosion einer A- oder H-Bombe oder dem dabei entstehenden radioaktiven Niederschlag herrührt. Gehen die durch Strahlung erzeugten Veränderungen der Elektronenstruktur, d. h. die chemischen Veränderungen, über ein bestimmtes Maß hinaus, so bewirken sie das Absterben der Zellen. Die verschiedenen Gewebe des Körpers unterscheiden sich in ihrer Empfindlichkeit gegenüber Strahlung ungeheuer stark, mit am empfindlichsten sind die Blutzellen und das

blutbildende Gewebe. Empfängt der Körper eine große Strahlungsdosis, so vermindert sich sehr schnell die Zahl der roten und weißen Blutkörperchen. Weil die letzteren bei der Bekämpfung von Infektionen eine wichtige Rolle spielen, ergibt sich als ernste sekundäre Wirkung der Bestrahlung eine verringerte Abwehrkraft des Körpers gegenüber Infektionen. Unter diesen Umständen können sonst relativ unbedeutende Infektionskrankheiten zum Tod führen. Es ist sicher, daß viele der Todesfälle in Hiroshima und Nagasaki durch diese sekundäre Wirkung bedingt waren. Eine andere Wirkung hoher Strahlungsdosen ist der teilweise oder vollkommene Haarausfall, der auch von Strahlungsdosen herrühren kann, die sonst keine merklichen Wirkungen erzeugen, der dann aber gewöhnlich nur vorübergehender Natur ist.

Außer der betrachteten direkten Zerstörung der Zelle gibt es die kompliziertere und in vieler Hinsicht ernstere Wirkung, daß die Zelle weiterlebt, aber ihre Lebensvorgänge durch die Strahlung in tiefgreifender Weise beeinflußt wurden. Die Strahlung kann den Beginn eines regellosen, *bösartigen* Wachstums der Zellen verursachen, das man als *Krebs* bezeichnet. Die Krebserzeugung durch Strahlung ist bereits seit langer Zeit bekannt, nämlich seitdem der Gebrauch von Radium und ähnlichen Substanzen zum Bemalen von Uhrenzifferblättern den tragischen Tod vieler Arbeiter bewirkt hatte. In diesen Fällen lagerten sich die radioaktiven Stoffe, es handelte sich um Alphastrahlen, im Knochenmark ab und erzeugten dort durch die Beeinflussung der Zellen unter anderem tödlichen Knochenkrebs.

Ähnlich war die Situation bei den Bergleuten, die am Anfang des Jahrhunderts, als die Gefahren der Radioaktivität noch nicht bekannt waren, in Europa radioaktives Erz förderten. Nach einem kürzlich erschienenen englischen Bericht starb nahezu die Hälfte der Bergleute, die zu jener Zeit das radioaktive Erz förderten, an Lungenkrebs. Die Ursache war, daß das aus dem Erz entweichende radioaktive Gas und dessen feste, ebenfalls radioaktive Zerfallsprodukte eingeatmet wurden und auf diese Weise das Lungengewebe einer starken Alphastrahlung ausgesetzt war. Besonders schlimm ist, daß die Zeit, bis der durch Strahlung erzeugte Krebs beobachtbar

wird, die *Latenzzeit*, äußerst lang ist; bei den Bergleuten z. B. betrug sie im Durchschnitt 17 Jahre. Die Leuchtzifferblattmaler, die an Knochenkrebs starben, lebten, nachdem sie zum erstenmal der Strahlung ausgesetzt wurden, noch zwischen 3 und über 15 Jahre.

Als die Gefahren der Strahlung noch ungenügend bekannt waren, benützte man für bestimmte Anwendungen in großem Umfang Röntgenstrahlen, so daß einzelne Personen oft unwissentlich schwerwiegende Strahlungsdosen erhielten. Tatsächlich liegt die mittlere Lebenszeit von Ärzten, die einen großen Teil ihrer Zeit mit der Röntgenstrahlenbehandlung von Patienten zubringen, unter der von Ärzten, die keiner Röntgenstrahlung ausgesetzt sind. Die durchschnittliche Lebenszeit der Röntgenologen ist etwa 5 Jahre kürzer als die der keiner Röntgenstrahlung ausgesetzten Ärzte. Heute ist auch eindeutig erwiesen, daß die Strahlung zu *Katarakten* (Anm. d. Übers.: als Katarakt bezeichnet man eine Trübung der Augenlinse) führen kann. Besonders groß ist in diesem Fall die Empfindlichkeit gegenüber Neutronen hoher Energie; so bildeten sich vor dem Erkennen dieser Gefahr bei mehreren Physikern, die während ihrer Arbeit an einem Zyklotron Neutronenstrahlen ausgesetzt waren, Katarakte.

Durch Bestrahlung kann auch *Leukämie* entstehen, eine Krankheit, bei der im blutbildenden Gewebe des Knochenmarks eine regellose Überproduktion weißer Blutkörperchen stattfindet. Man hat z. B. festgestellt, daß bei den Überlebenden von Hiroshima und Nagasaki viermal so viele Leukämiefälle auftraten, als man in der gleichen Zeit für eine japanische Bevölkerung gleicher Zahl und Zusammensetzung, die aber der Bombenstrahlung nicht ausgesetzt war, erwartet hätte. Eine sehr bedauerliche Quelle für Kenntnisse über die Strahlenschädigung des Menschen bildet die Verwendung von Röntgenstrahlen zur Behandlung verschiedener Krankheiten, besonders in der Zeit, als die Gefahren der Strahlung noch nicht genügend bekannt waren. Man stellte fest, daß bei einer Reihe von Patienten, die vor etwa 20 Jahren wegen einer Krankheit mit Röntgenstrahlen behandelt wurden, ungefähr zehnmal soviel Leukämieerkrankungen auftraten als normal. Man weiß auch, daß sich bei kleinen Kindern, die unglück-

licherweise wegen kleinerer Leiden wie Bronchitis oder Mandelentzündung mit Röntgenstrahlen behandelt wurden, Schilddrüsenkrebs entwickelte. Dabei betrug die Zeit zwischen der Bestrahlung und dem merkbaren Auftreten des Schilddrüsenkrebses im Durchschnitt etwa 7 Jahre.

Genetische Strahlenfolgen

Außer der direkten Zerstörung von Zellen und der Veränderung des Zellenwachstums, für welche die von uns beschriebene Krebsentwicklung ein Beispiel bietet, gibt es eine andere Wirkung der Strahlung, die noch komplizierter und noch schwieriger zu verstehen ist, so daß auch die Angabe einer Sicherheitsgrenze für die Bestrahlung unsicher ist. Diese letzte Art der Strahlenwirkung, die wir behandeln wollen, läßt sich schwer untersuchen, weil sie nicht bei dem bestrahlten Individuum, sondern erst bei dessen Nachkommen in Erscheinung tritt. Es handelt sich um die *genetische Wirkung* der Strahlung, die bedingt ist durch Veränderungen der Keimzellen, Veränderungen, die sich von Generation zu Generation fortpflanzen.

Man weiß heute ziemlich gut, wie die erblichen Merkmale, die durch die in den Keimzellen befindlichen *Gene* bestimmt sind, von Generation zu Generation weitergegeben werden; eine praktische Anwendung finden diese Kenntnisse bei der Züchtung von Tieren und Pflanzen. Die erblichen Merkmale, wie z. B. die Augenfarbe, die Haarfarbe, die Intelligenz und die Anlage für bestimmte Krankheiten sind durch eine Vielzahl von winzigen Genen bestimmt, die in den Keimzellen enthalten sind. Bei der Befruchtung vereinigt sich eine Eizelle mit einer Samenzelle. Die Gene der befruchteten Eizelle setzen sich aus den Genen der weiblichen und der männlichen Keimzelle zusammen, die dabei mögliche Vielzahl von Genkombinationen, die sich statistisch beschreiben läßt, verursacht die Abänderung der Merkmale der Nachkommen. Diese statistische Abänderung der Merkmale bewirkt im Zusammenhang mit der natürlichen Auslese eine Verbesserung der in der Natur vorkommenden Arten. Die Individuen, die eine bezüglich

ihrer Umwelt zweckmäßige Kombination von Genen aufweisen, werden wahrscheinlicher überleben und sich fortpflanzen als die Individuen mit einer ungünstigen Genkombination, so daß im Laufe langer Zeit eine Verbesserung der Art stattfindet.

Eine Abänderung der erblichen Merkmale einer Art ist nicht nur durch die statistischen Kombinationen der Gene, sondern auch durch *Genmutationen* möglich; darunter versteht man die durch physikalische oder chemische Einflüsse bewirkte dauernde Veränderung eines Gens. Genmutationen treten auch spontan ein, d. h. ohne besondere Beeinflussung. Verändert sich in einer Keimzelle ein Gen, so verändert sich auch das durch dieses Gen bestimmte Merkmal. Alle weiteren Keimzellen, die durch Zellteilung, *Mitose*, aus der Keimzelle mit dem mutierten Gen entstehen, enthalten dieses veränderte Gen, weil jede der beiden Zellen, die bei der Mitose entstehen, wieder genau die gleichen Gene enthält wie die ursprüngliche Zelle. Ganz gleich, wie viele Tausende von Zellteilungen stattfinden, die Gene bleiben immer genau die gleichen, wenn nicht eine Mutation auftritt und dann das mutierte Gen weiterbesteht.

Aus der Bildung gleicher Keimzellen bei der Mitose folgt nicht, daß die Individuen der folgenden Generation nun sämtlich das veränderte, der Mutation entsprechende Merkmal, z. B. eine veränderte Haarfarbe, aufweisen. Wie bereits beschrieben, kombiniert das veränderte Gen bei der Befruchtung statistisch mit einem anderen Gen. Obgleich dabei die einzelnen Gene unverändert erhalten bleiben, ist es die entstehende *Kombination* von Genen, die maßgeblich ist für die Ausbildung des entsprechenden Merkmals des Nachkommen. Trotzdem ist das mutierte Gen für die Vererbung genauso wirksam, wenn nicht *alle* Individuen, die das veränderte Gen besitzen, unfähig sind, sich fortzupflanzen; nur durch diesen „genetischen Tod" wird ein bestimmtes Gen ausgeschaltet. Viele Mutationen bewirken so geringe Merkmalsänderungen, daß sie kaum wahrgenommen werden können, andererseits können Mutationen auch so große Veränderungen hervorrufen, daß sich die Zelle nicht mehr teilen kann und die Mutation nicht weitergetragen wird, sondern den genetischen

Tod erleidet. Genmutationen sind schwerwiegend, weil bei weitem der größte Teil von ihnen nachteilige Merkmalsänderungen verursacht. Es ist nicht überraschend, daß Genmutationen gewöhnlich schädlich sind, denn es handelt sich um zufällige Änderungen einer Genanordnung, die durch natürliche Auslese bereits hochentwickelt ist.

Natürlich sind es die nützlichen Genmutationen, die, obgleich sie selten sind, die Arten verbessern. Man benützt sie seit Jahrhunderten für die Verbesserung von Pflanzen und Tieren durch Zuchtwahl. Heute kann die Züchtung sehr beschleunigt werden, weil die Mutationsrate durch Strahlung vergrößert werden kann. Extrem große Strahlungsdosen zerstören natürlich die Keimzellen, aber kleinere Dosen werden Genmutationen auslösen, ohne daß die Teilung der Keimzellen beeinflußt wird. Im Zusammenhang mit strahlungsinduzierten Mutationen werden heute sehr viele experimentelle Arbeiten durchgeführt, besonders in der Landwirtschaft, in der es ziemlich einfach ist, die Zahl der Mutationen durch Bestrahlung von Samen zu erhöhen, und die entstehenden Merkmale der wachsenden Pflanzen zu beobachten. Die sich aus den bestrahlten Samen entwickelnden Pflanzen werden sorgfältig auf verbesserte Merkmale hin beobachtet und dann gegebenenfalls weitergezüchtet, um die Veränderung aufrechtzuerhalten. Auf diese Weise wurden bereits brauchbare Ergebnisse erzielt, und heute sind einige Pflanzenarten im Handel, die man mit Hilfe strahlungsinduzierter Mutationen erhalten hat.

Nachdem die Strahlung Genmutationen auslösen kann, und zwar bei großen Strahlungsdosen sehr viele, ist das ganze Problem sehr ernster Natur. Da die meisten Genmutationen negativ sind, kann man nicht einfach sagen, die strahlungsinduzierten Mutationen sind keineswegs schädlich, weil sie eine Verbesserung der Art bewirken. Die wenigen vorteilhaften Mutationen nützen der Art nur, wenn die vielen schädlichen dadurch ausgeschaltet werden, daß sich die zugehörigen Individuen nicht fortpflanzen können. Bei den modernen Lebensbedingungen ist es keineswegs sicher, daß diese „natürliche" Auslese in der Menschheit wirksam stattfindet.

Die durch genetische Folgen bedingten Sicherheitsgrenzen

für Bestrahlung werden durch die im Falle eines Atomkrieges auftretende Bestrahlung weit überschritten. Bei diesem sind die Strahlungsintensitäten so ungeheuer groß, daß man kaum zu untersuchen braucht, ob sie die durch genetische Folgen bedingte Sicherheitsgrenze überschreiten; sie überschreiten nicht nur diese bei weitem, sondern auch die viel höheren, durch andere Strahlungsschäden bedingten Sicherheitsgrenzen. Wir beschäftigen uns hier mit dem täglichen friedlichen Gebrauch der Atomenergie, in diesem Fall kann man sehr schwer entscheiden, welche Strahlungsdosis für Menschen noch zulässig ist. Es handelt sich dabei um den Schutz vieler kommender Generationen und um Wirkungen, die wir bis heute nur unvollständig verstehen. Nun wollen wir aber sehen, auf welchem Weg trotz ungenügender Kenntnisse die „Sicherheitsgrenzen" der Strahlung bestimmt werden und wie bei dem friedlichen Gebrauch der Atomenergie Sicherheit erreicht wird.

Die Sicherheitsgrenzen der Strahlung

Im Zusammenhang mit den friedlichen Anwendungen der Atomenergie gibt es viele Möglichkeiten, daß ein Mensch große Strahlungsdosen empfängt. Beim Betrieb eines Reaktors wäre das möglich, wenn die Abschirmung rund um den Reaktor nicht ausreichend ist, ein Fall, der praktisch keine Rolle spielt, weil eine ausreichende Abschirmung leicht vorgesehen werden kann. Man kann aber aus dem Reaktor auf indirektem Wege Strahlung empfangen, und das zu vermeiden ist etwas schwieriger.

Zum Beispiel ist bei einem gasgekühlten Reaktor das aus dem Reaktor austretende Gas gefährlich. Einige der ersten Reaktoren werden einfach durch Hindurchpressen von Luft gekühlt, die dann in die Atmosphäre austritt. Gewöhnlich steigt die austretende, radioaktive Luft in der Atmosphäre so weit hinauf, daß die Radioaktivität weitgehend abgeklungen ist, bevor sich auf dem Erdboden schädliche Mengen ablagern können. Bei ungewöhnlichen Wetterbedingungen könnte aber das radioaktive Material schneller auf den Erdboden zurückkehren, es könnte z. B. durch Regen heruntergebracht werden, so daß sich

schädliche Mengen ablagern könnten. Eine andere Gefahr ergibt sich aus den beim Betrieb von Reaktoren entstehenden großen Mengen von radioaktiven Abfallprodukten, hauptsächlich Spaltbruchstücken. Die Beseitigung dieser radioaktiven Abfälle wird ein immer größeres Problem. Man kann sie an einem unzugänglichen Ort so lange aufbewahren, bis die Radioaktivität praktisch vollständig verschwunden ist; unglücklicherweise haben aber einige Spaltprodukte eine sehr lange Halbwertszeit, so daß sie noch nach einigen tausend Jahren radioaktiv sind. Die radioaktiven Abfälle können also nicht einfach im Meer versenkt werden. Auch wenn sie viele Jahre sicher in den Behältern blieben, würden sie nach dem Freiwerden durch Meeresströmungen weit verteilt werden und könnten Schaden anrichten. Eine zusätzliche große und weitgehend unbekannte Gefahr ergibt sich daraus, daß bestimmte tierische Lebewesen dazu neigen, gewisse chemische Elemente anzureichern. Sind diese Elemente unter den Spaltprodukten vorhanden, so kann die Radioaktivität stark konzentriert werden. Erfolgt diese Konzentration etwa in einer eßbaren Fischart, so könnten Menschen radioaktive Substanzen in weit größeren Mengen aufnehmen, als man unter Zugrundelegung einer gleichmäßigen Verteilung erwarten würde.

Wir sprachen bisher von dem mehr oder weniger normalen Reaktorbetrieb, nicht aber von Unglücksfällen. Zum Beispiel würden die bei der Explosion eines atomaren Kraftwerkes freigesetzten Spaltprodukte, wenn sie über eine bewohnte Umgebung verstreut werden, eine äußerst große Gefahr darstellen. Auch der Transport von Radioisotopen von dem Reaktor, in dem sie hergestellt werden, zu den Laboratorien, wo sie für die Forschung oder für die Behandlung von Krankheiten benützt werden, bildet mögliche Gefahren; er muß sorgfältig durchgeführt werden, so daß keine Verseuchung der Umgebung erfolgt.

Will man die für den Gebrauch der Atomenergie nötigen Sicherheitsvorkehrungen treffen, so muß man zuerst entscheiden, welchen Dosen verschiedener radioaktiver Strahlung der Mensch ausgesetzt werden kann, ohne Schaden zu erleiden. Die höchstzulässige Dosis bezeichnet man als *Toleranzdosis*, das ist die Dosis radioaktiver Strahlung, der nach unseren

gegenwärtigen Kenntnissen eine Person unbeschränkt ausgesetzt werden kann, ohne merklichen körperlichen Schaden zu nehmen. Die Toleranzdosis wird gewöhnlich als die Dosis angegeben, die man innerhalb einer bestimmten Zeit empfangen darf. Grundsätzlich müßte man die Toleranzdosis nicht nur für jede Strahlungsart, sondern auch für jedes Körpergewebe gesondert angeben, weil die schädlichen Wirkungen von der Art der Strahlung und des Gewebes abhängig sind. Wir brauchen uns mit der damit verbundenen Komplizierung nicht zu beschäftigen, weil wir nur an den praktisch benützten Sicherheitsvorkehrungen interessiert sind.

Die zur Angabe von *Strahlungsdosen* benützte Einheit ist das *„Röntgen"*, die Bezeichnung wurde zu Ehren des Physikers Röntgen, des Entdeckers der Röntgenstrahlen, gewählt. Als ein Röntgen oder „r" definiert man diejenige Menge einer Strahlung, die in einer bestimmten Luftmenge eine bestimmte Zahl von Ionen erzeugt. Komplizierte Zusammenhänge herrschen zwischen der biologischen Wirksamkeit und der Art der Strahlung und des Gewebes, aber für uns genügt es, wenn wir wissen, daß Strahlungsdosen in Röntgen oder in einer viel kleineren Einheit, dem *Milliröntgen* oder „mr", dem tausendsten Teil eines Röntgen, gemessen werden.

Die Toleranzdosis für in Atomenergieanlagen beschäftigte Personen beträgt gegenwärtig 300 mr je Woche. Die betreffenden Personen werden sorgfältig überprüft, um feststellen zu können, ob die Toleranzdosis überschritten wurde. Sie müssen ständig kleine, in Form und Größe einem Füllhalter sehr ähnliche Instrumente tragen, deren Anzeige von der Größe der bis zur Ablesung insgesamt empfangenen Strahlungsdosis abhängig ist. Die Instrumente werden in regelmäßigen Zeitabständen abgelesen, hierzu haben einige eine Skala, andere müssen mit einem Spannungsmesser ausgemessen werden.

Zieht man nicht nur die in Atomenergieanlagen Beschäftigten in Betracht, sondern die ganze Bevölkerung und insbesondere die genetischen Folgen für die gesamte Menschheit, so wird die Angabe einer Toleranzdosis viel schwieriger. Maßgebend für die genetischen Folgen ist die Gesamtdosis, die ein Mensch in der Zeit empfängt, die zwischen seiner Geburt und

der Zeugung der Nachkommen liegt, im Durchschnitt eine Zeitdauer von etwa 30 Jahren. Eine Möglichkeit, die in dieser Fortpflanzungsperiode höchstzulässige Strahlungsdosis zu bestimmen, ergibt sich aus dem Vergleich mit der *natürlichen Rate* der Genmutationen, welche die Wahrscheinlichkeit angibt, mit der ein Gen innerhalb einer bestimmten Zeit eine Mutation erleidet, ohne daß künstliche Einflüsse wirksam waren; soweit nicht noch andere natürliche Ursachen eine Rolle spielen, kommt also nur die vorhandene natürliche Strahlung in Betracht. Zur Berechnung müssen viele, nur mangelhaft bekannte Beziehungen verwendet werden. Die besten gegenwärtigen Schätzungen besagen, daß sich, wenn die gesamte Bevölkerung je Person während der 30jährigen Fortpflanzungsperiode etwa 50 Röntgen empfangen würde, die Genmutationsrate verdoppeln würde.

Eine Vorstellung, wie klein diese Dosis ist, erhalten wir durch den Vergleich mit den 300 mr je Woche, die für Personen in Atomenergieanlagen zulässig sind und je Jahr 15,6 r, in 30 Jahren also 468 r ergeben — die zehnfache Größe der Dosis, welche die Mutationsrate verdoppelt. Die zulässige Dosis für die in Atomenergieanlagen Beschäftigten kann höher gehalten werden, weil die genetischen Folgen für die gesamte Bevölkerung nicht von der Dosis, die eine bestimmte Gruppe von Personen empfängt, sondern von der im *Durchschnitt* empfangenen Dosis abhängen. Die neuesten Empfehlungen besagen, daß die gesamte Bevölkerung je Person im *Durchschnitt* bis zu 30 Jahren nicht mehr als 10 r und *Einzelpersonen* bis zu 30 Jahren nicht mehr als 50 r und zwischen 30 und 40 Jahren nicht mehr als nochmals 50 r empfangen sollen.

Diese niedrigen Toleranzdosen werden hauptsächlich wegen der ernsten und weitreichenden Folgen strahlungsbedingter Mutationen empfohlen. Die Empfehlungen zeigen, mit welch großem Ernst heute die genetische Situation betrachtet wird, und betonen, daß sehr strenge Maßstäbe angelegt werden müssen, wenn sichergestellt werden soll, daß die genetischen Folgen der Strahlung den Generationen ferner Zukunft keinen großen Schaden zufügen.

Strahlenschutz und Versicherung

Bei den friedlichen Anwendungen, wie der Erzeugung elektrischer Energie und dem Gebrauch von Radioisotopen in der Forschung, gibt es keinen prinzipiellen Grund, warum die empfohlenen Strahlungsdosen nicht eingehalten werden könnten. Wir sagen „prinzipiell", weil wir nicht den Eindruck erwecken wollen, als wäre es leicht, diese niedrigen Werte einzuhalten. Es ist zwar möglich, die Strahlung auf nahezu jeden gewünschten Wert zu verringern, aber es erfordert immer weitgehendere Vorsichtsmaßnahmen. Kernreaktoren können nahezu beliebig gut abgeschirmt werden, so daß die in der Nähe arbeitenden Personen nur sehr kleine Strahlungsdosen aufnehmen. Arbeitsvorgänge an Reaktoren können mit Spezialwerkzeugen und Schutzkleidung durchgeführt werden, ein Beispiel zeigt Fig. 44 (Tafel). Radioisotope können in genügend großen Behältern transportiert und durch Fernbedienung gehandhabt werden, so daß die Beschäftigten keine zu großen Strahlungsdosen empfangen.

In den Angelegenheiten des Strahlenschutzes muß ein gesundes Gleichgewicht erreicht werden. Man kann die höchstzulässigen Dosen nicht einfach auf einen extrem niedrigen, willkürlichen Wert festsetzen; viele Vorgänge würden dann derart kostspielig werden, daß sie einfach nicht durchgeführt werden könnten. Auch wenn die Atomenergie nicht existieren würde, wäre die Menschheit einer natürlichen Strahlenbelastung ausgesetzt, z. B. den energiereichen Teilchen, die als *kosmische Strahlen* in die Erdatmosphäre eintreten, oder der Strahlung, die von den Verunreinigungen der Stoffe mit Uran und Radium herrührt.

Außer der Durchführung ausreichender Schutzmaßnahmen, die gewährleisten, daß niemand eine zu große Strahlungsdosis erhält, muß berücksichtigt werden, daß trotz der Schutzmaßnahmen Strahlung erzeugende Unfälle passieren können. Obwohl die Möglichkeit eines großen Reaktorunfalles fern zu liegen scheint, müssen die Gesellschaften, die diese Reaktoren bauen, die Möglichkeit einer Katastrophe in Betracht ziehen. Würde ein großer Leistungsreaktor derart zerstört werden, daß das in ihm enthaltene radioaktive Material über

ein dicht bewohntes Gebiet verstreut würde, so erlitte die Bevölkerung sehr großen Schaden. Die Schadensdeckung eines Unfalls von solcher Größe ist bei der gegebenen Struktur der Versicherungswirtschaft nahezu unmöglich. Das mit einer Katastrophe großen Ausmaßes verbundene finanzielle Risiko wird derzeit auf mehrere hundert Millionen Dollar geschätzt, eine Summe, die selbst von einer Gruppe von Versicherungsfirmen in den USA nicht aufgebracht werden könnte.

Aus der Schwierigkeit, große Anlagen gegen solche Katastrophen zu versichern, ergibt sich eine abschreckende Wirkung auf Programme für den Bau großer Leistungsreaktoren. Es ist nicht so, als ob in der Industrie noch nie große Risiken vorhanden gewesen wären, aber die Atomenergie hat sich eben so rasch entwickelt, daß noch sehr wenig Erfahrungen vorliegen, die den Aufbau einer geeigneten Versicherung unterstützen könnten. Die Experten der Versicherungswirtschaft sind heute übereinstimmend der Ansicht, daß private Gesellschaften kaum das große Risiko übernehmen können, und daß nahezu sicher der Staat einspringen muß, wahrscheinlich indem er die Risiken übernimmt, die durch eine Gruppe von Privatfirmen nicht mehr abgedeckt werden können. Im Mai 1956 wurde in den Vereinigten Staaten von 155 Sachversicherungsgesellschaften eine Kernenergie-Sachversicherungsgesellschaft gegründet. Diese Gruppe kann Sachschäden bis zu 50 Millionen Dollar allein decken. Diese Entwicklung bedeutet zwar eine große Hilfe, aber der Betrag reicht noch nicht aus, um ein größeres Unglück zu decken. Ebenso ist unbedingt eine Haftpflichtversicherung notwendig, aber obwohl sie vom Joint Committee on Atomic Energy empfohlen wurde, hat der Kongreß noch nichts unternommen, sie 1956 einzuführen. Die Pläne kommen jedoch 1957 wieder vor den Kongreß, und wahrscheinlich wird innerhalb kurzer Zeit irgendeine Form der staatlichen Versicherung gebildet. Hat man erst Erfahrungen mit dem Betrieb großer atomarer Anlagen gewonnen, so wird die Versicherung so gehandhabt werden, wie sie bei den herkömmlichen Anlagen, z. B. großen chemischen Fabriken, bei denen auch bestimmte Unfälle eintreten können, durch private Versicherungsgesellschaften gehandhabt wird.

Schutz bei Bombenversuchen

Gegenwärtig beschäftigt man sich viel mit den möglichen Wirkungen der Strahlung, die von Versuchen mit A- und H-Bomben herrührt. Es ist richtig, daß die Streitfrage der „Einstellung der H-Bombenversuche" bei der Wahl des Präsidenten 1956 weitgehend mit Wahlkampfangelegenheiten vermengt wurde. Dies tut aber der Tatsache, daß es sich um ein äußerst ernstes Problem handelt, das nicht nur von Wissenschaftlern, sondern von allen verständigen Bürgern auf der ganzen Welt sorgfältig bedacht werden muß, keinen Abbruch. Weil wir uns mit den friedlichen Anwendungen der Kernenergie beschäftigen, ist es nicht angebracht, daß wir auf die verschiedenen Arten der Bomben eingehen, daß wir untersuchen, in welchem Ausmaß durch ihre Explosion Radioaktivität freigesetzt wird oder wie bei der sogenannten „sauberen Bombe" die freigesetzte Radioaktivität geregelt werden kann. Zu dem Fortschritt der friedlichen Nutzung der Atomenergie tragen die Bombenversuche sehr wenig bei; sie haben für unser Hauptanliegen, den friedlichen Gebrauch der Atomenergie, sehr wenig Bedeutung. Es ist aber wohl der Mühe wert, wenn wir uns etwas mit den Gefahren der Bombenversuche beschäftigen; dabei zeigen sich auch die von Reaktoren herrührenden Gefahren, die auch nach der möglichen Einstellung der Bombenversuche noch vorhanden sind; aber die Versuche sind Unternehmungen, die sicher nicht leicht aufgegeben werden können, und mit denen man deshalb rechnen muß, wenn wir der Vorteile der Atomenergie teilhaftig werden wollen, ohne dabei ihre Risiken übermäßig zu vergrößern. Die Gefahren der Radioaktivität, die bei einer Bombenexplosion entsteht, rühren in erster Linie von den Radioisotopen her, die dabei in die Tropo- oder Stratosphäre gelangen und die sich zum Teil sehr kurz, zum Teil erst lange Zeit, bis zu Jahren, nach der Explosion ablagern und auf der Erde einen *radioaktiven Niederschlag* (auch als „fallout" bezeichnet, Anm. d. Übers.) bilden. Die im radioaktiven Niederschlag enthaltenen Radioisotope sind uns aus der früheren Diskussion der Anwendung von Radioisotopen für die Forschung und medizinische Verfahren bereits bekannt, nur sind dort

normalerweise die benützten Mengen ungeheuer viel kleiner. Die Wirkungen des radioaktiven Niederschlages sind also die gleichen wie die bei den Leitisotopen oder im Kapitel über die Gefahren der Strahlung behandelten — es können Zellen zerstört werden, es kann Krebs erzeugt werden, es können langandauernde genetische Wirkungen verursacht werden.

Als seit dem ersten Versuch im Jahre 1945 die Zahl der Versuche und die Größe der Bomben schnell zunahmen, wurde die Möglichkeit einer Einstellung der Versuche immer mehr diskutiert, nicht nur hinsichtlich der Abrüstung, sondern auch wegen der Gefahren, die von der großen Menge von Radioisotopen herrühren, die in die Atmosphäre geschleudert werden und sich dann auf der ganzen Welt ablagern. Obgleich einige der Vorschläge zweifellos in den Bereich der Propaganda gehörten, waren viele erfahrene Wissenschaftler mit gesundem Urteilsvermögen der Ansicht, daß dieses Problem sorgfältige Beachtung finden sollte, damit wir nicht gedankenlos viele kommende Generationen schädigen.

Auf den Vorschlag vieler Organisationen und einzelner Personen wurde 1955 die Nationale Akademie der Wissenschaften der Vereinigten Staaten beauftragt, die biologischen Wirkungen ionisierender Strahlen zu untersuchen. Das Komitee legte seinen Bericht im Sommer 1956 vor, um die gleiche Zeit wurde vom Medizinischen Forschungsrat in England ein ähnlicher Bericht herausgegeben. Viele Einflüsse der Strahlung wurden betrachtet: die genetischen Wirkungen, die direkte Schädigung des Menschen (Pathologie), meteorologische Wirkungen, Wirkungen auf Fische und in der Landwirtschaft und die Beseitigung radioaktiver Abfälle. Die Berichte des Komitees betonten besonders die Frage der genetischen Wirkungen und die weitreichenden Folgen der durch Strahlung ausgelösten Mutationen. Aus diesem Grunde wurde für die gesamte Bevölkerung eine durchschnittliche Strahlungsdosis angegeben, die bis zum Alter von 30 Jahren nicht überschritten werden soll.

Im allgemeinen sah man die genetischen Folgen als die schwerwiegendsten an, die Größe der höchstzulässigen Dosis wird also durch sie bedingt. Die genetisch festgelegte Dosis ist viel kleiner als die durch andere Schäden bedingten Tole-

ranzdosen. Eine Ausnahme gilt jedoch im Fall des *radioaktiven Strontiums*, das 1956 bei dem Präsidentenwahlkampf so viel Interesse erweckte; hier ist die direkte Gefahr für den Menschen wesentlich. Radioaktives Strontium ist besonders gefährlich, weil eines seiner Isotope eine Halbwertszeit von 25 Jahren hat und weil es nach seinem Eintritt in den Körper wie das Kalzium teilweise in den Knochen abgelagert wird. Dort bleibt es für den Rest des Lebens und kann, wie das Radium in den Knochen der Leuchtzifferblattmaler, Knochenkrebs und andere Krankheiten hervorrufen. Die Gefahr läßt sich schwer abschätzen, weil es schwierig ist, anzugeben, wieviel radioaktives Strontium sich schließlich in den Menschen ablagern wird. Obgleich die bisher durch Bombenversuche freigesetzte Menge von radioaktivem Strontium gering ist, wenn man sie auf die ganze Erdbevölkerung bezieht, besteht doch Gefahr, weil die Möglichkeit einer Konzentration des Strontiums erheblich ist; z. B. fand man radioaktives Strontium in der Milch von Kühen, die beim Weiden Gras gefressen hatten, auf dem sich radioaktives Strontium abgelagert hatte. Würden Kinder, denen es an Kalzium mangelt, diese Milch trinken, so würde sich ein großer Teil des radioaktiven Strontiums für dauernd in ihren Knochen ablagern und so möglicherweise schwerwiegende Wirkungen hervorrufen. Ein kürzlicher Bericht zeigt, daß im Gebiet von St. Louis die Menge des radioaktiven Strontiums in der Milch ständig langsam zunimmt, allerdings liegt die Menge noch weit unter der Toleranzdosis.

Obgleich es den Anschein hat, daß die bisher durch Bombenexplosionen freigesetzte Radioaktivität weit unter der Sicherheitsgrenze liegt, ist die zukünftige Situation ungewiß. Um einen Maßstab zu haben, wollen wir einige Zahlenangaben über die natürliche, nicht von Bomben stammende Strahlenbelastung machen, der wir ständig ausgesetzt sind. Bilden wir aus den Angaben des amerikanischen und englischen Berichtes den Mittelwert, so ergibt sich, daß ein Mensch infolge der *Hintergrund-Strahlung*, die aus *natürlichen Quellen*, wie den in der Erde vorhandenen radioaktiven Stoffen, den kosmischen Strahlen usw. stammt, im Verlaufe von 30 Jahren eine Dosis von etwa 4 Röntgen empfängt. Wegen der medizinischen

Anwendungen von Röntgenstrahlen empfängt ein Individuum durchschnittlich noch eine zusätzliche Dosis von etwa 2 Röntgen, insgesamt also 6 r, eine Dosis, die gegenüber der von 10 r, die nach den Empfehlungen im Laufe der ersten 30 Jahre nicht überschritten werden soll, keineswegs klein ist.

Zum Vergleich mit diesen Strahlungsquellen wird geschätzt, allerdings mit großer Unsicherheit, daß ein Mensch, wenn die Bombenexplosionen in der gleichen Art und mit der gleichen Häufigkeit wie in den letzten Jahren fortgesetzt werden, schließlich im Verlaufe von 30 Jahren eine Dosis von einem Drittel Röntgen erhält. Das ist verglichen mit der von natürlichen Quellen und medizinischen Röntgenstrahlen herrührenden Dosis wenig, aber es ist sehr gut möglich, daß die Häufigkeit der Versuchsexplosionen zunimmt. Aus den früher angegebenen Zahlen können wir schließen, daß, wenn die Häufigkeit der Versuchsexplosionen um den Faktor 150 zunimmt, alle Menschen der Erde durchschnittlich die Dosis empfangen, die eine Verdoppelung der natürlichen Mutationsrate bewirkt. Diese Verdoppelung der natürlichen Mutationsrate ist eine sehr ernste Sache. Zum Beispiel zeigen sich in den Vereinigten Staaten gegenwärtig bei 4 Prozent der Neugeborenen deutliche Schäden genetischer Natur, eine Verdoppelung dieser Zahl würde eine riesige Zahl beobachtbarer Strahlungsschäden ergeben. Glücklicherweise scheint es heute wegen der Wirkung internationaler Untersuchungskommissionen und der Entwicklung „sauberer" Bomben äußerst unwahrscheinlich, daß der radioaktive Niederschlag schneller zunimmt als bisher.

Landessicherheit und Tatkraft

Im letzten Abschnitt diskutierten wir die Fortsetzung der Bombenversuche hauptsächlich im Hinblick auf die dem Menschen zugefügten Strahlungsschäden. Nicht berührt haben wir die weitgespannten und komplizierten Fragen, die mit den Bombenversuchen zusammenhängen, z. B. die Notwendigkeit der Bombenentwicklung für die nationale Sicherheit. Es ist hier nicht angebracht, auf die politischen und mora-

lischen Gesichtspunkte der Außenpolitik der Vereinigten Staaten und auf die in ihr bestehenden Beziehungen zwischen der Bombenentwicklung und der Abrüstung einzugehen. Aber ein Gesichtspunkt der militärischen Anwendung der Atomenergie betrifft uns sicher — die Sache der Sicherheit und die Bemühung, diese durch Geheimhaltung zu erreichen. Schritte zur Aufrechterhaltung unserer militärischen Stärke haben nämlich eine sehr direkte Wirkung auf die Entwicklung der friedlichen Nutzung der Atomenergie. Hier konkurrieren nicht nur Geld und Mensch, sondern auch Geheimhaltung und Tatkraft.

Die schwierige und für die erfolgreiche Entwicklung der Atomenergie sehr wichtige Frage ist, wie wir bei dem Bemühen, unsere Stellung relativ zu anderen Ländern, besonders möglichen Feinden gegenüber, durch Geheimhaltung unserer Fortschritte aufrechtzuerhalten, Nachteile vermeiden können. Es ist richtig, daß wir auf diese Weise ihren Fortschritt verzögern können, aber gleichzeitig behindern die Geheimhaltungsbeschränkungen vielleicht unser eigenes Programm. Ohne Zweifel ist der wichtigste Punkt die nationale Sicherheit. Bei der Sicherheit handelt es sich aber nicht nur um die Bewahrung unserer Geheimnisse, sondern um die Sicherheit unserer ganzen Nation und um die Beziehung *aller* Teile unseres Atomenergieprogramms zu dieser umfassenden Sicherheit. Es ist notwendig, diese Angelegenheiten etwas ausführlicher zu behandeln, nur ein gründliches Verständnis der entsprechenden Grundlagen kann unseren Bürgern helfen, die Atomenergie so zu handhaben, daß unsere nationale Sicherheit aufrechterhalten wird, und die Anwendungen der Atomenergie zur Verbesserung unseres Lebens möglichst wenig behindert werden.

Wendet man den Begriff der Sicherheit auf atomare Angelegenheiten an, so erhält man viele komplizierte Zusammenhänge, die man kaum verstehen kann, ohne den Begriff der Sicherheit selbst betrachtet zu haben. Für ein Individuum steht die Sicherheit irgendwie in Zusammenhang mit der Erhaltung der für dieses bedeutsamen Dinge. Seine Sicherheit umfaßt das Vertrauen auf den fortwährenden Besitz der Dinge, die ihm ermöglichen, ein gutes Leben zu führen, so z. B. der Besitz,

die Gesundheit, Gedanken- und Religionsfreiheit – der Grad der Bedeutung, den die einzelnen Dinge haben, hängt vom jeweiligen Individuum ab. Seine Sicherheit beim Besitz dieser Dinge ist durch Gesetze gewährleistet, die diese Dinge bewahren sollen, und ebenso durch seine eigenen Bemühungen für die Ausbildung, die Versicherung und die Aufrechterhaltung der Gesundheit.

Eine analoge Situation liegt vor, wenn es sich um die Sicherheit der Nation handelt, der Art von Sicherheit, die so eng mit den atomaren Angelegenheiten verbunden ist. Die nationale Sicherheit bezieht sich auf die Bewahrung der Dinge, welche die Bürger als wichtige Bestandteile des nationalen Lebens ansehen. Der nächstliegende Gedanke ist in diesem Fall der Schutz des Landes gegenüber Eroberung. Bei näherer Überlegung ist es jedoch klar, daß Dinge, wie die durch die Bill of Rights (Anm. d. Übers.: die ersten 10 Zusatzartikel zur amerikanischen Verfassung) garantierte Freiheit und die nationale Stärke, die sich daraus ergibt, daß alle Bürger frei ihre Fähigkeiten entfalten können, für den Schutz der Nation fast gleich wichtig sind.

Wird über die Beziehung zwischen Sicherheit und atomaren Angelegenheiten diskutiert, so ist der wesentliche Punkt meistens die unmittelbare Sicherheit der Nation, ihr Schutz im einfachen Sinn. Die Diskussionen sind gewöhnlich durch die unrichtige und irreführende Ansicht gekennzeichnet, daß unsere Sicherheit gewährleistet ist, wenn es uns gelingt, unsere Geheimnisse zu bewahren. Diese Auffassung von der Sicherheit führt zu einer Gleichsetzung von Sicherheit und Geheimhaltung und zu so einfachen Schlußfolgerungen, daß wir um so sicherer sind, je mehr wir unsere Ergebnisse zurückbehalten, oder daß jede Information, die unseren möglichen Feinden zukommt, unsere Lage gegenüber diesen verschlechtert. Betrachtet man aber den Begriff der Sicherheit im weiteren Sinn, unter Berücksichtigung aller Mittel, die notwendig sind, um die von uns gewünschte Art des nationalen Lebens aufrechtzuerhalten, so fällt die vereinfachte Gleichsetzung von Sicherheit und Geheimhaltung weg. Es wird dann offensichtlich, daß das Zurückbehalten von Informationen in vielen Fällen ein Schritt zur Unsicherheit sein kann und

nicht umgekehrt. Die Sicherheit unserer Nation ergibt sich nämlich aus einer Vielzahl von Faktoren, die mit unserer gesamten Stärke gegenüber möglichen Feinden zusammenhängen. Diese Stärke hängt mehr davon ab, was wir tatsächlich Positives erreicht haben, und wie unsere Fähigkeiten im Vergleich zu denen unserer möglichen Feinde sind, als von der einfachen und einseitigen Fragestellung, was ihnen über unsere Unternehmungen bekannt ist.

Die umfassendere Betrachtungsweise besteht darin, sich deutlich zu machen, daß es sowohl positive Seiten der wahren Sicherheit als auch negative Seiten der Geheimhaltung gibt, und daß die ersteren wichtiger sind als strengere Geheimhaltung. Der richtigen Auffassung der Sicherheit entspricht mehr die viel benützte Formulierung „Sicherheit durch Tatkraft" als die „Sicherheit durch Geheimhaltung". Wegen der verschiedenen Ansichten über die Bedeutung des Wortes Sicherheit könnte man sagen, es ist möglich, „Sicherheit durch Unsicherheit" zu erreichen, mit anderen Worten: die wahre Sicherheit kann oft durch etwas gefördert werden, das man im engen Sinn der Sicherheit, also im Sinne einer strengen Geheimhaltung, als Unsicherheit bezeichnet.

Weil die Sicherheit den tagtäglichen Ablauf des atomaren Geschehens in Amerika beeinflußt, sind sowohl Menschen als auch Unterlagen betroffen. Die personelle Sicherheit hat in öffentlichen Diskussionen viel Interesse hervorgerufen, aber von höherer Bedeutung für die Aufrechterhaltung einer wahren nationalen Sicherheit ist die Sicherheit von Berichten, Daten, Plänen, die *Informationssicherheit.* Es ist interessant, daß in beiden Fällen, bei der personellen und der Informationssicherheit, die eben diskutierte Auffassung der positiven und negativen Seiten eine wichtige Rolle spielt.

Leider neigte man in der Vergangenheit dazu, bei beiden Arten der Sicherheit die negativen Seiten zu betonen; im Bereich der personellen Sicherheit zeigt sich dies an den weitgehend veröffentlichten Verhören in Sachen der *Unbedenklichkeitserklärung,* die alle Personen brauchen, die an geheimen Arbeiten teilnehmen. Hier bewirkt die Betonung des Negativen, daß vorwiegend die nachteiligen Auskünfte über eine Person Beachtung finden, ohne daß diese gegen deren

positive Beiträge abgewogen werden, die je nach der Person ungeheuer verschieden sein können. Es handelt sich hier um den gleichen Standpunkt, den wir vorher bei der Informationssicherheit beschrieben haben, nämlich, daß möglichen Feinden nicht die geringste Information zukommen sollte, weil ihr Programm möglicherweise unterstützt werden könnte. Dabei wird aber nicht berücksichtigt, daß die Freigabe von Informationen unsere eigene Stärke vergrößern und der daraus resultierende Einfluß auf die gegenseitige Lage viel bedeutsamer sein könnte.

Atomare Sicherheit nach Genf

In den Jahren vor der 1955 abgehaltenen Genfer Konferenz „Atome für den Frieden" gelangte man von der negativen Auffassung der Informationssicherheit allmählich zu einer Verwirklichung der wichtigen positiven Seiten. Diese Verwirklichung fiel zusammen mit der zunehmenden Bedeutung, welche die friedlichen Anwendungen der Kettenreaktion im Vergleich mit ihrem militärischen Gebrauch erlangten. In Anbetracht der Erzeugung elektrischer Energie und der Verwendung von Radioisotopen sind die positiven Seiten der Sicherheit viel leichter zu würdigen als in früheren Zeiten, als nur die Bombe wesentlich war. Obgleich es richtig ist, daß die positive Sicherheit auch dann noch höchst wichtig ist, wenn nur die Bombenentwicklung betrachtet wird, so machen die nützlichen Anwendungen der Atomenergie die Rechtfertigung der strengen Geheimhaltung als Mittel der Sicherheit doch viel schwieriger.

Heute, zwei Jahre nach der Genfer Konferenz, ist es der Welt klar, daß wir die ungeheure Menge unserer Ergebnisse auf dem Gebiet der friedlichen Verwertung der Atomenergie veröffentlichen, daß wir bereit sind, allen Nationen zu helfen und uns von ihnen helfen zu lassen. Die in und nach Genf unternommenen Schritte der Vereinigten Staaten zeigen, daß wir uns bei den friedlichen Anwendungen auf unsere Tatkraft und nicht auf die Geheimhaltung verlassen. Wie wir im vorhergehenden Kapitel erwähnten, hielten die Sowjets in Genf,

etwas zu unserer Überraschung, in jeder Weise Schritt mit unserer Freigabe von Informationen und unserer Bereitschaft zur Zusammenarbeit. Die vernünftigste Erklärung für die sowjetische Mitarbeit in Genf ist, daß sich der Kreml, gleich aus welchem Grund, dafür entschieden hat, daß auf diesem Gebiet eine echte Zusammenarbeit, anstatt bloßer Propaganda, die beste Politik ist. Diese Entscheidung bewirkt nicht notwendig eine Zusammenarbeit auf anderen Gebieten, aber wir wollen das Erlangte schätzen und versuchen, in anderen Bereichen Ähnliches zu erreichen, wir wollen nicht durch gedankenlosen Zynismus etwas Wertvolles verlieren. Vielleicht sind die Sowjets zu der Schlußfolgerung gelangt, nach der wir, so hoffe ich, handeln, nämlich, daß die beste Politik für den atomaren Fortschritt die Sicherheit durch Tatkraft ist, wobei die Geheimhaltung auf das unbedingt notwendige Maß beschränkt bleibt.

Es ist jetzt angebracht, zu untersuchen, ob und wie unser System der atomaren Sicherheit in Anbetracht der Geschehnisse von Genf verändert werden sollte. Die Arbeit der Vereinigten Staaten lieferte in Genf sicher den überragenden Beitrag, das erlaubt aber nicht den Schluß, daß damit unser Sicherheitsprogramm der letzten zehn Jahre gerechtfertigt ist und unverändert weitergeführt werden sollte. Die Konferenz zeigte endgültig, daß die Russen entgegen der alten Idee, daß sie ohne Hilfe von Spionen nichts erreichen könnten, in den letzten zehn Jahren auf dem Gebiet der Atomenergie ungeheure Fortschritte gemacht haben. Kürzlich wurde durch Trumans Memoiren bekannt, daß Stalin 1945 erwähnte, daß seine Wissenschaftler versucht hätten, Atombomben zu entwickeln, aber zu keinem Ziel gelangt wären. In Genf zeigte sich ein ganz anderes Bild: Die sowjetischen Wissenschaftler trugen Arbeiten mit hohem wissenschaftlichen Niveau vor, Arbeiten, die zwar auf den meisten Gebieten etwas hinter unseren lagen, die aber energisch vorangetrieben wurden.

Der vielleicht stärkste einzelne Eindruck, den die amerikanischen Wissenschaftler aus Genf mitnahmen, war die veränderte Einschätzung der Stellung der Sowjets, die zunehmende Kompetenz ihrer technischen Arbeit. Diese Folgerung widerspricht nicht der wesentlichen Wirkung der positiven

Sicherheit, der Beschleunigung der Entwicklung, wenn sie von Beschränkungen der Geheimhaltung befreit wird. Einer der wesentlichen Faktoren unserer Überlegenheit — ohne Verwendung ausgesprochen technischer Angaben läßt sich das allerdings schwer eindeutig zeigen — war, daß viel von unserer Arbeit nicht geheimgehalten worden war, hauptsächlich Grundlagen der Kernphysik, die für die Atomenergie von Bedeutung sind. Unsere Führung war auf Gebieten, die in den Vereinigten Staaten zugänglich, in Rußland aber geheim waren, weit größer als auf Gebieten, die vor Genf in beiden Ländern geheim waren.

Aus diesem Vergleich ergibt sich die etwas überraschende, doch sehr bedeutsame Tatsache, daß wir weiter vorne lagen, obwohl unsere Arbeit auf diesen Gebieten den Sowjets völlig zugänglich war. Diese Situation ist ein deutlicher Beweis dafür, wie sich die Arbeit auf einem geheimen Gebiet in Rußland verzögerte, obgleich die amerikanischen Arbeiten voll zur Verfügung standen. Die sowjetischen Wissenschaftler wurden dadurch behindert, daß sie ihre Arbeit nicht frei mit Kollegen diskutieren konnten und so die offene Kritik und das sorgfältige Abwägen der Resultate nicht zustande kommen konnte, wie es wirksam nur auf einem freien Gebiet geschieht.

Natürlich kann das, was wir in Genf über die positive Sicherheit gelernt haben, nicht in extremer Weise angewendet werden. Wir können nicht folgern, daß man das gesamte Atomenergieprogramm, sowohl Bomben als Reaktoren, freigeben sollte. Es ist richtig, daß jeder Bereich des Programms, wenn er freigegeben würde, schneller voranschreiten würde, aber im rein militärischen Rahmen müssen wir die kurzfristigen Vorteile der Geheimhaltung gegen die durch die Freigabe sicher erfolgende Beschleunigung abwägen. Die Geheimhaltung der Methoden, mit denen man Bomben so auslöst, daß sie eine möglichst große Explosionswirkung ergeben, oder die Schnelligkeit, mit der wir Bomben herstellen — Angelegenheiten, die sehr wichtig sein könnten, wenn in einigen Jahren ein Krieg stattfinden sollte —, bringt uns offensichtlich Vorteile. Nachdem uns die Geheimhaltung aber nur vorübergehende Vorteile verschafft, sollten wir sie nur benützen, wenn wir willens sind, auf den Anstoß zu verzichten, den

die Entwicklung durch eine volle Veröffentlichung erfahren würde.

In Genf gaben wir sehr viele Informationen über friedliche Verwendungen der Atomenergie, vor allem auf dem Gebiet der Gewinnung elektrischer Energie, dagegen gaben wir keine Auskunft über rein militärische Anwendungen. Die Unterscheidung läßt sich zwar leicht anführen, kann aber in der Praxis manchmal nur sehr schwer durchgeführt werden. Besonders schwierig wird sie bei den großen, für die Erzeugung von Spaltstoffen verwendeten Reaktoren, wie z. B. den Plutonium erzeugenden Reaktoren in Hanford. Die Verfahren, die man im einzelnen benützt, um die Leistung und damit die Schnelligkeit der Plutoniumerzeugung möglichst groß zu machen, sind militärisch offensichtlich bedeutsam, gleichzeitig sind sie aber sehr wichtig für die zivilen Zwecken dienenden Leistungsreaktoren. Deshalb muß die Situation ständig sorgfältig überprüft und die kurzfristige Notwendigkeit der militärischen Geheimhaltung mit der positiven Wirkung der Freigabe verglichen werden.

Die eben besprochene Verbesserung unserer Lage gegenüber anderen Nationen, die sich aus der Situation ergibt, die nicht durch strenge Geheimhaltung und die damit verbundene Begünstigung einer staatlichen Organisation, sondern durch Informationsfreiheit ausgezeichnet ist, bildet die Grundlage der Auffassung, daß die positive Sicherheit unsere größte Stärke ist. Am besten wird die positive Sicherheit in einer Demokratie gedeihen, und unsere Führung dürfte sich verstärken, wenn im Laufe der Zeit immer mehr Gebiete unserer Forschung aus dem Dunkel der Geheimhaltung ins volle Licht der normalen, freien, wissenschaftlichen Wechselwirkung gelangen.

Die Entwicklung der Atomenergiekommission

In gewisser Hinsicht brauchen wir die Stellung, welche die AEC auf dem Gebiet der Atomenergie in den Vereinigten Staaten einnimmt, nicht gesondert zu betrachten, denn praktisch alle Unternehmungen, die wir in diesem Buch betrachtet

haben, fallen entweder direkt in den Verantwortungsbereich der Kommission oder sie spielt bei ihnen eine wesentliche Rolle. Es gibt kaum irgendeinen Bereich der Atomenergie oder eine ihrer vielen Anwendungen, die von der Kommission nicht direkt oder indirekt beeinflußt werden, auch wenn wir den Zusammenhang nicht in jedem Fall herausgestellt haben. Aus den in diesem Kapitel behandelten Themen — Strahlenschutz und nationale Sicherheit — erwachsen der Atomenergiekommission einige ihrer schwierigsten Aufgaben. Weil die Kommission bei der Durchführung dieser Aufgaben das Leben des Volkes am unmittelbarsten beeinflußt, wird ihr in diesem Zusammenhang auch am wahrscheinlichsten öffentliche Kritik zuteil.

Die schwerwiegenden Gefahren der Atomenergie lassen leicht starke gefühlsmäßige Reaktionen aufkommen. Weil die Gefahren der Strahlung großes öffentliches Interesse finden und die möglichen Folgen oft stark übertrieben werden, ist es besonders wahrscheinlich, daß an der Kommission feindselige Kritik geübt wird. Es ist schwierig, die Öffentlichkeit aufzuklären, ohne sie zugleich unsinnig zu erschrecken. Es ist auch schwierig, bei der Festsetzung von Schutzvorschriften ein richtiges Gleichgewicht zwischen dem Schutz der Menschen und unnötig komplizierten Schutzmaßnahmen, die das Atomenergieprogramm aufhalten würden, herzustellen. Die gleiche Art von Gleichgewicht muß in Dingen der Landessicherheit erreicht werden, hier darf die Geheimhaltung weder zu streng noch zu frei gehandhabt werden, weil sonst unser Programm zu stark behindert wird oder die Gefahr einer wirklichen Einbuße an relativer militärischer Stärke gegeben ist. Die Streitfrage der Versuchsexplosionen hat besonders während des Präsidentenwahlkampfes breites Interesse gefunden. Die Kommission hat bei all diesen Angelegenheiten eine wichtige Rolle gespielt und wahrscheinlich mehr Tadel als Lob empfangen, oft auf Grund ungenügender Unterrichtung.

Nachdem die Atomenergiekommission praktisch der einzige Wächter über ein so neues und sowohl gefährliches als auch nützliches Gebiet ist, ist es wahrscheinlich nicht überraschend, daß in ihr bereits viele Streitigkeiten ausgetragen wurden. Sie wurde in einer Zeit gegründet, in der die richtige Eingliede-

rung der Atomenergie in die öffentlichen und privaten Unternehmungen der Vereinigten Staaten sehr umstritten war. Die mit der Bildung der Kommission einhergehende ausgedehnte öffentliche Diskussion brachte vielen Wissenschaftlern die ihnen neben ihrer ruhigen Forschungsarbeit neu erwachsene Bedeutung und Pflicht gegenüber dem Leben der Nation zum Bewußtsein. Die große Streitfrage im Jahre 1945 war, ob die Atomenergie von dem „Manhattan Projekt" der Armee in die Zuständigkeit einer staatlichen Kommission übergeführt werden sollte. Als damals offensichtlich wurde, daß die Atomenergie möglicherweise ständig unter die Kontrolle des Verteidigungsministeriums gestellt werde, ein Schritt, der von den meisten Wissenschaftlern als gefährlich angesehen wurde, stürzten sich viele von ihnen in fieberhafte politische Aktivität.

Da der Großteil der Öffentlichkeit die Atomenergie nur als militärische Waffe kannte, ist es nicht überraschend, daß man allgemein der Ansicht war, daß die Atomenergie im Bereich der Armee verbleiben sollte. Praktisch wußten nur die Wissenschaftler, daß die Atomenergie viele Möglichkeiten bietet, die weit wichtiger sind als ihre Anwendung für eine Bombe, und daß in einer Demokratie ein Werkzeug mit so ungeheuren Möglichkeiten der friedlichen Verwertung nur unter ziviler Kontrolle gebraucht werden kann. Die Art der öffentlichen Debatte und der Untersuchungen des Kongresses und das schließliche Erreichen einer Lösung sind ein sehr gutes Beispiel, wie solche Streitfragen in einer Demokratie gelöst werden können. Die Untersuchungen des Kongresses, die manchmal recht streng waren, drangen gründlich in alle Bereiche des Atomenergieprogramms ein. Schließlich kam man zu dem Ergebnis, daß man die neue Kraft nur unter ziviler Kontrolle in wirksamer Verbindung mit dem Kongreß und dem Verteidigungsministerium handhaben kann. Das Ergebnis der ausführlichen Untersuchungen des Kongresses war das 1946 verabschiedete McMahon-Gesetz, welches das gesamte Atomenergieprogramm einer zivilen, aus fünf Mitgliedern bestehenden Kommission unterstellte.

Die erste Atomenergiekommission unter dem Vorsitz von David Lilienthal baute die zur Kommission gehörige Organisation auf und formulierte viele ihrer Arbeitsgrundsätze,

einige davon haben heute noch Gültigkeit. Die Kommission hatte von Anfang an umfassende Vollmachten, viele von ihnen unterlagen wegen der strengen Geheimhaltung der Entwicklung und Produktion von Bomben ungewöhnlich wenig der Kontrolle durch den Kongreß. Die hauptsächliche Kontrolle durch den Kongreß erfolgte durch das Joint House-Senate Committee on Atomic Energy. Der Ernst, mit dem sich dieses Komitee seiner Arbeit widmete, war von Beginn an offensichtlich und hat seitdem keine Änderung erfahren.

Seit dem Bestehen der Atomenergiekommission ist das Programm ungeheuer fortgeschritten, sowohl in der Vielfalt, als auch im Umfang, das geht aus allen früheren Kapiteln dieses Buches hervor. Diese Entwicklung ging nicht ohne Unstimmigkeiten vor sich, doch brachten die meisten der Meinungsverschiedenheiten, wenn sie auch zeitraubend waren, am Ende nützliche Resultate, denn sie führten zu Verbesserungen der Organisation der Kommission, zur verbesserten Handhabung des Leistungsreaktorprogramms durch die Kommission und die Privatindustrie und zu einem besseren Verständnis der Zusammenhänge zwischen Sicherheit und Atomenergie.

In den Jahren des Aufbaus der Kommission führten einige Differenzen über grundlegende Ansichten zu zunehmender Reibung zwischen dem Joint House-Senate Committee und der Atomenergiekommission, die ihren Höhepunkt in der öffentlichen Untersuchung der „unglaublichen Mißwirtschaft" in der Kommission erreichte. Diese Untersuchungen, die lange dauerten und, wie oft, einen politischen Akzent trugen, führten zu einem von der Mehrheit unterstützten Bericht, der die Kommission von den schweren gegen sie erhobenen Beschuldigungen im großen und ganzen entlastete. Die Untersuchungen hatten aber zweifellos einen gewissen nützlichen Einfluß auf die Verbesserung der Organisation der Kommission, und die in dem Untersuchungsbericht des Komitees enthaltene konstruktive Kritik half der Kommission bei der Durchführung ihrer vielfältigen Aufgaben.

Ein Problem, das der Kommission seit jeher viele Schwierigkeiten macht, ist die Herstellung eines geeigneten Gleichgewichts zwischen den Interessen der Landessicherheit und

den Interessen der Grundlagenforschung, deren Fortschritt einen freien Gedankenaustausch erfordert. Der Weg in dieser Angelegenheit war kurvenreich, und die Kommission erfuhr von seiten der Wissenschaftler oft starke Kritik, trotzdem ergaben sich im ganzen gesehen ständig Verbesserungen im Verstehen des Problems und der für die „Unbedenklichkeitsbestätigung“ erforderlichen Verwaltungsverfahren, so daß diese das Programm möglichst wenig behindern.

Als aufgedeckt wurde, daß Spione, wie Allan Nunn May und Klaus Fuchs, den Sowjets wertvolle Informationen geliefert hatten, war das verständlicherweise von großem Einfluß auf die Geheimhaltung. Die Sicherheitsvorschriften für Wissenschaftler und technische Angaben wurden in einem Maß verschärft, das in keinem Verhältnis mehr zu dem Wert der von diesen Personen übermittelten Informationen stand. Den Höhepunkt erreichte die Angelegenheit der personellen Sicherheit mit dem „Fall Oppenheimer“. J. R. Oppenheimer, der während des Krieges Direktor des Los Alamos Laboratoriums war, wurde von der Kommission die Unbedenklichkeitsbestätigung verweigert und zwar auf Grund eines langwierigen Verhörs, das von einem Untersuchungsausschuß durchgeführt wurde. Diese Entscheidung wurde von vielen Wissenschaftlern stark kritisiert, hauptsächlich aus der Überzeugung, daß bei dem für die Unbedenklichkeitsbestätigung benutzten Verfahren nachteilige Informationen nicht durch positive Beiträge der betreffenden Person ausgeglichen werden konnten. Trotzdem hat die mit der Entscheidung über Oppenheimer verbundene ausgedehnte öffentliche Diskussion unleugbar sehr zu einer Klärung des Problems und damit zu einer Besserung des zukünftigen Sicherheitssystems der Kommission beigetragen. Es ist äußerst bedauerlich, daß diese Diskussion nicht durch das Sicherheitsproblem als solches, sondern durch seinen Zusammenhang mit einer bestimmten Person hervorgerufen wurde.

Seitdem wurden die Methoden der Untersuchung von Sicherheitsangelegenheiten und der Durchführung von Verhören sehr verbessert in der Absicht, den betroffenen Personen weniger Schaden zuzufügen. Im Laufe längerer Zeit bewirkte außerdem der Verzicht auf Sicherheitsforderungen für Stel-

lungen, die nur mit nicht geheimen Unterlagen zu tun haben, eine Verringerung der Hindernisse, die das Sicherheitssystem für den Fortschritt der Grundlagenforschung mit sich bringt. Es wurden auch viele bedeutsame Schritte unternommen, um geheimes Material zugänglich zu machen. So sind heute viele Gebiete der Atomenergie vollständig freigegeben, und die Forschungsergebnisse können von Anfang an ohne irgendwelche komplizierte Genehmigungsverfahren frei mitgeteilt werden. Das Sicherheitssystem der Kommission, sowohl hinsichtlich der personellen als auch der Informationssicherheit, wird heute von vielen als das beste aller Regierungsstellen angesehen, das die anderen nachahmen sollten. Der Stand der Dinge entspricht noch keiner vollkommenen Lösung, aber es wurden wesentliche Fortschritte gemacht.

Gegenwärtige Probleme der Atomenergiekommission

Zur Zeit findet noch eine andere Streitfrage viel Aufmerksamkeit, sie ist Gegenstand vieler ernster Diskussionen und wie üblich auch mancher unverantwortlicher Stellungnahmen. Diese Frage betrifft den geeigneten Weg, auf dem die atomare Energiegewinnung in den Vereinigten Staaten vorangetrieben werden soll, besonders, seitdem der Wettbewerb durch das Ausland schnell zunimmt. Es handelt sich im wesentlichen um die grundlegende Frage, ob die Vereinigten Staaten bereits jetzt Leistungsreaktoren bauen sollen, oder ob das Programm vorläufig hauptsächlich der Forschung dienen soll und große Anlagen erst gebaut werden, wenn die Reaktortypen wesentlich verbessert wurden. Wir haben in Kapitel IV bereits verschiedene technische Gesichtspunkte der wirtschaftlichen Erzeugung von Atomenergie besprochen und wollen jetzt nur die Tätigkeit der Kommission betrachten.

Es ist offensichtlich, daß die Wirksamkeit der Kommission in dieser Sache, wie auch bei der Sicherheit und anderen umfassenden praktischen Angelegenheiten, für die Bestimmung des zukünftigen Verlaufes der atomaren Entwicklung von ungeheurer Bedeutung ist. Wieder ist es äußerst kompliziert, den besten Weg zur Förderung des Programms zu finden und

dabei einen geeigneten Ausgleich zwischen den vielen einander widerstrebenden Kräften zu erreichen. Gegenwärtig erfährt die Kommission viel ungerechtfertigte Kritik, weil dadurch, daß England jetzt ein atomares Kraftwerk in Betrieb hat, das wirklich elektrische Energie in das Netz liefert, der Eindruck des Zurückbleibens der Vereinigten Staaten entsteht. Die Betrachtungen von Kapitel IV lassen uns erkennen, daß diese Schlußfolgerung falsch ist und bei einem richtigen Vergleich der Programme der Vereinigten Staaten und Englands noch viele andere Faktoren berücksichtigt werden müssen, als nur die bloße Tatsache, daß in England gegenwärtig ein Atomkraftwerk in Betrieb ist.

Leider sind an dem Streit um die richtige Entwicklung der Atomenergiegewinnung auch einige in den Vereinigten Staaten bereits seit langem bestehende Differenzen beteiligt, so daß das Problem noch schwieriger ist, als wenn es allein auf technischem Gebiet liegen würde. Das alte Problem des Gegensatzes zwischen privaten und öffentlichen Kräften wird deutlich an der Planung der Atomkraftwerke — sollen sie mit privatem Kapital oder unter staatlicher Bürgschaft gebaut werden? Sicher ist es richtig, daß die Kosten für große Atomkraftwerke von der Privatwirtschaft allein nicht getragen werden können und deshalb der Staat diese Entwicklung unterstützen sollte. Außerdem sollte der Staat diese neue Kraft für die Verbesserung unseres Lebens — wo es notwendig ist — rasch vorantreiben, einfach deshalb, weil die Bevölkerung, die einen so großen Teil ihrer Entwicklung bezahlt hat, ein Recht darauf besitzt, möglichst schnell in den Genuß ihres Nutzens zu kommen. Auch ist es offensichtlich vernünftig, private Gesellschaften an dem Programm zu beteiligen oder sie zur Aufstellung eines eigenen zu ermutigen, so daß ihre ungemein erfolgreichen Methoden dem Programm zugute kommen können. Wie wir in Kapitel IV gesehen haben, wird in nicht ferner Zeit eine wirtschaftliche Atomenergieerzeugung möglich sein. In diesem Stadium wird die Entwicklung in den Vereinigten Staaten kaum schnell voranschreiten, wenn der in Amerika übliche freie Wettbewerb der Privatindustrie nicht voll wirksam ist.

Der Aufbau des Energieprogramms steht keineswegs still.

In einer Rede vor der Amerikanischen Gesellschaft für Kernforschung und Kerntechnik am 11. Dezember 1956 kündigte der Vorsitzende der AEC, Strauss, an, daß er eine große Erweiterung des Leistungsreaktorprogramms vorschlagen werde. Er gab an, daß als Hilfe für die Erweiterung in Kürze sehr viele technische Angaben über Leistungsreaktoren freigegeben würden. Er schlug vor, außer den jetzt geplanten etwa 18 zivilen Atomkraftwerken, für die über eine halbe Milliarde Dollar Kosten veranschlagt sind, noch fünf zusätzliche Leistungsreaktoren zu bauen. Gebaut werden sollen diese Leistungsreaktoren von der Privatindustrie, nötigenfalls aber auch von der Kommission. Die von Admiral Strauss angekündigte Freigabe von Unterlagen erfolgte einige Tage später, die Richtlinien hierfür beruhten auf einem Übereinkommen zwischen den Vereinigten Staaten, Kanada und Großbritannien.

Vor kurzem wurde die Kommission in einen neuen Streit verwickelt, der durch seine politische Bedeutung beim Präsidentenwahlkampf sehr verstärkt wurde. Es handelt sich um die Gefahren des radioaktiven Niederschlages und die damit zusammenhängende Möglichkeit eines Verbots von A- und H-Bombenversuchen. Wie wir gesehen haben, ist die auf den radioaktiven Niederschlag der bisher explodierten Bomben zurückgehende Strahlung sehr gering im Vergleich zu der Strahlenbelastung, der wir bereits aus anderen Quellen ausgesetzt sind. Man muß aber ständig die Gefahr einer Fortsetzung oder sogar Zunahme der Bombenversuche im Auge behalten. In der Tat besteht gegenwärtig zwischen den Wissenschaftlern sehr wenig Meinungsverschiedenheit über die Größe der durch den radioaktiven Niederschlag bedingten Strahlungsbelastung, und daß diese *etwas* Gefahr, die jedoch sehr geringfügig ist, mit sich bringt. Der Streit konzentriert sich auf die ethische Frage des Abwägens zwischen dieser Gefahr und der Behinderung der Entwicklung einer wichtigen Abschreckungswaffe. Glücklicherweise arbeitet das auf den Vorschlag der Vereinigten Staaten hin gebildete Strahlungskomitee der Vereinten Nationen heute erfolgreich und scheint die volle Unterstützung sowohl der östlichen, als der westlichen Staaten zu erhalten. Es erscheint sehr wahrscheinlich, daß die vom Komitee hinsichtlich der Bombenversuche gegebenen

Empfehlungen, die den Schutz der gegenwärtigen und zukünftigen Weltbevölkerung gewährleisten sollen, von allen Nationen befolgt werden.

Das Problem des radioaktiven Niederschlages, ebenso wie das der atomaren Energieerzeugung, der nationalen Sicherheit und der militärischen Kontrolle zeigen, daß die unterrichtete öffentliche Meinung, die freie Diskussion und die sorgfältige Untersuchung, auch wenn sie durch starke Gefühlsregungen betont oder sogar gefördert werden, den Weg weisen zur Verwirklichung der Möglichkeiten, welche die Atomenergie für die Bereicherung des menschlichen Lebens bietet.

IX

KERNVERSCHMELZUNG

> Ich wage vorauszusagen, daß man innerhalb der nächsten zwei Jahrzehnte eine Methode zur geregelten Freisetzung der Kernverschmelzungsenergie finden wird. Geschieht dies, so sind die Energieprobleme der Welt wirklich für immer gelöst, denn Brennstoff wird dann ebenso reichlich vorhanden sein wie schweres Wasser in den Weltmeeren.
>
> *H. J. Bhabha, Eröffnungsansprache der Genfer Konferenz, 8. August 1955.*

Nachdem wir gesehen haben, auf welche Weise die Kernspaltung der Menschheit Vorteile bringt, und wie sehr diese neue Kraft bereits in unser Leben eingedrungen ist, wollen wir uns jetzt der etwas ferneren Zukunft zuwenden — der Möglichkeit, daß eines Tages auch die Kernverschmelzung (auch als Fusion bezeichnet, Anm. d. Übers.) der Menschheit zu einem besseren Dasein verhilft. Wir haben die Erörterung der friedlichen Verwendung der Fusion absichtlich bis zum Ende unserer Ausführungen über die Kernspaltung aufgeschoben, denn sie liegt noch in so weiter Zukunft, daß Betrachtungen über den Gebrauch der Kernspaltung angestellt werden können und sollen, ohne daß sie durch die Möglichkeit der baldigen Existenz einer Fusionsenergiequelle beeinflußt werden.

Auf der Genfer Konferenz „Atome für den Frieden" wurde tatsächlich und etwas unglücklich das Thema der Fusion als mögliche Energiequelle angeschnitten und führte für einige Tage zu einer Erschwerung der Diskussion der Kernspaltung als Energiequelle. Die Einführung war unglücklich, weil die Fusion von der nützlichen Anwendung im Vergleich zur Kernspaltung so weit entfernt ist, daß ihre mögliche zukünftige Bedeutung die gegenwärtige Planung der Kernspaltungs-

energiegewinnung und -forschung nicht beeinflussen sollte. Die Energie der Kernverschmelzung wurde zwar bei der Explosion von Wasserstoffbomben erfolgreich freigesetzt, aber eine Regelung dieser ungeheuren Energiequelle ist bis heute nicht gelungen. Die möglichen Wege zur Lösung dieses Problems und die bei der Kernverschmelzung stattfindenden Kernprozesse werden in diesem Kapitel betrachtet. Die in Kapitel II behandelten Grundlagen der Kernphysik ermöglichen uns das Verständnis der Fusion und der Verfahren, die sie als Energiequelle nutzbar machen könnten. Auf diese Weise wird es uns möglich, abzuschätzen, welche Rolle die Fusion schließlich in unserem Leben spielen wird und in welchem Ausmaß, wenn überhaupt, sie die Pläne zur Nutzung der Kernspaltungsenergie beeinflussen wird.

Grundlagen der Kernverschmelzung

Es liegt in der Kernstruktur begründet, daß von den Kernen der 101 bekannten Elemente die leichtesten und die schwersten weniger stabil sind als die Kerne mittleren Atomgewichts. Durch Kernprozesse, bei denen aus den schwersten und leichtesten Kernen leichtere bzw. schwerere, also stabilere Kerne entstehen, wird deshalb Energie freigesetzt. Somit wird Energie frei durch die Kernspaltung, bei der die schwersten Kerne in Kerne kleineren Atomgewichts *zerbrechen* und ebenso durch die Kernverschmelzung, bei der sich die leichtesten Kerne zu einem schwereren Kern *verbinden*. Bei beiden Reaktionen liegen die Atomgewichte der entstehenden Kerne näher bei mittleren Atomgewichten als die der ursprünglichen Kerne und es verschwindet Masse, d. h. die gesamte Masse der nach der Reaktion vorhandenen Kerne ist jeweils geringer als vor der Reaktion. Die dem Massenverlust entsprechende Energie erscheint in Form von Bewegungsenergie oder Strahlungsenergie. Die wesentlichen Eigenschaften der beiden Prozesse wurden bereits in Fig. 10 verdeutlicht.

Die Freisetzung großer Energiemengen durch Fusion ist auf der Erde erst vor kurzem erreicht worden, trotzdem ist dieser Vorgang schon immer unsere wichtigste Energiequelle gewesen,

er erzeugt nämlich die von der Sonne abgestrahlte Energie. Unter den extremen Bedingungen im Innern der Sonne – es herrschen Temperaturen von Millionen Grad Celsius, und die Dichte der Materie ist mehrere hundertmal so groß als auf der Erde – laufen die Fusionsreaktionen äußerst schnell ab und liefern die Energie, die die Sonne in Form von Licht und Wärme ausstrahlt. Temperaturen und Dichten, die auf der Erde erreicht werden können, sind viel zu gering, als daß diese Reaktionen in erheblicher Zahl je Zeiteinheit stattfinden könnten.

Die zugrunde liegenden Reaktionen sind uns zwar schon lange bekannt, aber wir konnten sie bisher nur als Reaktionen von Teilchen erhalten, die mit einem Zyklotron oder anderen Teilchenbeschleunigern beschleunigt wurden und nicht in Reaktionsstoffen hoher Temperatur und großer Dichte. Die in Kapitel II behandelten Grundlagen des Energieumsatzes bei Kernreaktionen ermöglichen uns auf sehr einfache Art zu berechnen, wieviel Energie bei Fusionsreaktionen freigesetzt wird. Einige der gebräuchlichsten Fusionsreaktionen der sehr leichten Elemente sind:

$$H^2 + H^2 \rightarrow He^3 + n + 3{,}3 \text{ Mev},$$
$$H^2 + H^2 \rightarrow H^1 + H^3 + 4{,}0 \text{ Mev},$$
$$H^2 + H^3 \rightarrow He^4 + n + 17{,}6 \text{ Mev}.$$

Diese etwas abgekürzte Schreibweise ist eine bequeme Form der Darstellung von Reaktionen; bei der ersten z. B. verschmelzen zwei Deuteriumkerne zu einem He^3-Kern, dabei werden ein Neutron und 3,3 Millionen Elektronenvolt Energie frei. Bei jeder der Reaktionen ist die gesamte Masse der Produkte rechts vom Pfeil kleiner als die der ursprünglichen Kerne links vom Pfeil. Mit der Massendifferenz und der Einsteinschen Gleichung läßt sich die frei werdende, jeweils angegebene Energie berechnen.

Als Ausgangsprodukte der angegebenen Reaktionen dienen zwei Isotope des Wasserstoffs, H^2 und H^3, also nicht das gewöhnliche Isotop H^1. H^2 ist schwerer Wasserstoff, Deuterium genannt, der zu einem geringen Bruchteil in gewöhnlichem Wasserstoff vorkommt und aus diesem durch Abtrennung von der viel größeren Menge des H^1 gewonnen wird. Obgleich das Abtrennungsverfahren etwas teuer ist, sind heute doch

viele Tonnen von Deuterium, gewöhnlich in Form von *schwerem Wasser,* verfügbar. Der mögliche Bedarf an Deuterium für Fusionsreaktionen bildet also kein Problem.

Wesentlich schwieriger ist die Herstellung von *Tritium,* H^3, das auch nicht beliebig lange aufbewahrt werden kann, weil es im Gegensatz zu den beiden anderen Wasserstoffisotopen instabil ist und mit einer Halbwertszeit von 12 Jahren zerfällt. Die Instabilität des Tritiums wird durch die dritte der oben angegebenen Reaktionen verdeutlicht, bei der mehr als viermal soviel Energie entsteht als bei den beiden anderen. Diese Reaktion verläuft auch sehr viel schneller als die beiden anderen und ist daher für die H-Bombe, in der die Energie explosionsartig freigesetzt wird, sehr geeignet.

Es ist wichtig, die bei der Fusion der leichten Kerne und der Kernspaltung der schweren Kerne freigesetzten Energiemengen sorgfältig miteinander zu vergleichen. Beim Vergleich der bei der Kernspaltung frei werdenden Energie von etwa 200 Mev mit den Energiemengen, die bei den obigen Fusionsreaktionen frei werden, muß das Gewicht der jeweils beteiligten Kerne berücksichtigt werden. Wir haben bereits in Kapitel II herausgestellt, daß, bezogen auf die *Gewichtseinheit,* also z. B. je Kilo Reaktionsstoff, bei den leichten Kernen ebensoviel oder mehr Energie entsteht als bei den schweren Kernen. Bei den oben angeführten Reaktionen entstehen je *Kilo* benütztes Material 24 Millionen, 29 Millionen und 101 Millionen Kilowattstunden, im Vergleich zu den 25 Millionen Kilowattstunden, die bei der Kernspaltung von einem Kilo Uran entstehen.

In Fig. 45 wird zeichnerisch dargestellt, wie die je Kilo Reaktionsstoff frei werdende Energie vom Atomgewicht abhängt, dabei wurden Reaktionen mit großer Energieausbeute gewählt. Man sieht, daß nur bei den leichtesten und den schwersten Elementen viel Energie entsteht, und daß bei einigen Fusionsreaktionen je Kilo weit mehr Energie frei wird als bei der Kernspaltung. Die Reaktion, bei der am meisten Energie je Kilo frei wird, ist die Verschmelzung zweier Deuteriumkerne zu einem Heliumkern:

$$H^2 + H^2 \rightarrow H^4 + 23{,}7 \text{ Mev.}$$

Obwohl je Kilo 172 Millionen Kilowattstunden frei werden, ist sie wegen ihres langsamen Verlaufes für die Erzeugung von

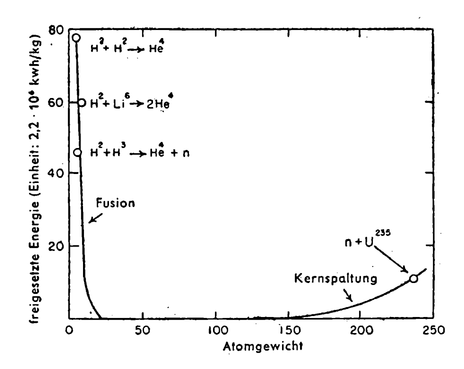


Fig. 45. Die pro Kilo Reaktionsstoff entstehende Energiemenge in Abhängigkeit vom Atomgewicht. Bei geringen Atomgewichten kann die Fusion, bei großen Atomgewichten die Kernspaltung Energie liefern; die Kernreaktionen bei mittleren Atomgewichten liefern so wenig Energie, daß sie außer acht gelassen werden können.

Fusionsenergie nicht geeignet. Ein Brennstoff, der für die Fusion sehr wichtig werden kann, ist das Lithiumisotop Li^6, denn seine Reaktion mit Deuterium liefert sehr viel Energie und verläuft auch schnell genug.

Der wesentliche Unterschied zwischen Kernspaltung und Kernverschmelzung besteht, soweit es sich um die praktische Energiegewinnung handelt, in der sehr großen Schwierigkeit, die leichten Elemente zur Reaktion zu bringen. Die an den Fusionsreaktionen teilnehmenden Kerne haben alle eine elektrische Ladung und stoßen sich daher ab. Während sehr langsame Neutronen in einen Urankern eindringen und Spaltung verursachen können — der Wirkungsquerschnitt nimmt mit abnehmender Geschwindigkeit sogar zu —, stoßen sich z. B. die Wasserstoffkerne H^2 und H^3 stark ab. Will man eine Kernverschmelzung und die damit verbundene Freisetzung von Energie erreichen, so muß diese Abstoßung irgendwie überwunden werden. Man kann natürlich Deuteronen oder Tritonen in einem Zyklotron beschleunigen und auf in Ruhe befindliche Atome treffen lassen, ein geringer Teil von ihnen wird dann den beschossenen Kernen so nahe kommen, daß Kernverschmelzung eintritt. Die beschleunigten Teilchen be-

wegen sich in diesem Fall so schnell, daß sie die elektrische Abstoßung überwinden können.

Die Zahl der in Teilchenbeschleunigern beschleunigten Teilchen ist aber so gering, daß eine praktische Energiegewinnung auf diese Weise nicht möglich ist. Es ist notwendig, daß der Großteil der in dem Reaktionsstoff enthaltenen Kerne zur Reaktion kommt. Diese Bedingung kann praktisch nur auf einem Weg erfüllt werden — es muß erreicht werden, daß sich *alle* Atome mit großer Geschwindigkeit bewegen. Bewegen sich alle Atome eines Stoffes schnell und in zufälligen Richtungen, so sagt man, daß sich der Stoff auf hoher Temperatur befindet. Ist die Temperatur genügend hoch, so braucht zur Förderung der Kernverschmelzung weiter nichts getan zu werden. Die Atome bewegen sich bei den notwendigen hohen Temperaturen, einigen zehn Millionen Grad, auf Grund der Wärmebewegung so schnell, daß sie trotz der elektrischen Abstoßung einander genügend nahekommen, um eine Kernverschmelzung eintreten zu lassen. Man bezeichnet die durch die Wärme oder die *thermische* Bewegung der Kerne zustande kommenden Fusionsreaktionen als *thermonukleare* Reaktionen.

Beginnt die Reaktion erst einmal, kommen also einige Atome so nahe zusammen, daß ihre Kerne verschmelzen, so vergrößert die dabei frei werdende Energie unter geeigneten Bedingungen die Geschwindigkeit anderer Atome noch mehr, so daß je Zeiteinheit ständig mehr Atome reagieren und entsprechend immer mehr Energie frei wird. Eben dieser Vorgang findet in der H-Bombe statt, nur in dieser konnten bisher die notwendigen hohen Temperaturen erzeugt werden. Wird in der Bombe eine Temperatur von über einer Million Grad Celsius erreicht, so beginnen die thermonuklearen Reaktionen, und die dabei freigesetzte Energie läßt die Temperatur noch mehr ansteigen. Dieser Prozeß stellt wie die Kernspaltung eine Kettenreaktion dar, auch hier wird, wenn die Reaktion genügend schnell verläuft und sich weit genug ausbreitet, explosionsartig eine ungeheuer große Energiemenge frei.

Bis heute konnte die erforderliche hohe Temperatur nur durch die Explosion einer Atombombe, also durch die bei der Kernspaltung frei werdende Energie, erzeugt werden. Eine

H-Bombe wird hergestellt, indem man die geeigneten leichten Elemente einer gewöhnlichen Atombombe beifügt, deren Explosion dann den Beginn der thermonuklearen Reaktion bewirkt. Die Explosionsenergie einer H-Bombe ist so groß, daß die gleichwertige Menge TNT (Abkürzung für den Sprengstoff Trinitrotoluol) in Millionen Tonnen und nicht wie bei der Atombombe in Tausenden Tonnen TNT angegeben wird. Die Erzeugung thermonuklearer Energie durch die Explosion einer Bombe ist, abgesehen von einigen unwahrscheinlichen Möglichkeiten, wie z. B. die Bewegung von Bergen oder das Schmelzen des Polareises, für die friedliche Anwendung nicht geeignet. Wir werden uns jetzt mit den Möglichkeiten der geregelten Freisetzung der Fusionsenergie und nicht mit der Freisetzung durch eine Explosion noch nie dagewesener Zerstörungskraft beschäftigen.

Der thermonukleare Reaktor

Wir haben gesehen, daß die praktische Gewinnung thermonuklearer Energie unbedingt hohe Temperaturen erfordert, und wie bei deren Erzeugung durch eine Bombenexplosion die Energie so schnell freigesetzt wird, daß ihre nützliche Verwendung schwer vorstellbar ist. Man steht also dem Problem gegenüber, extrem hohe Temperaturen in regelbarer Weise herstellen zu müssen. In der Sonne entsteht ständig thermonukleare Energie, aber die herrschenden Temperatur- und Druckverhältnisse unterscheiden sich von den auf der Erde erreichbaren so sehr, daß auf der Sonne thermonukleare Reaktionen in einer Weise ablaufen können, die auf der Erde nicht durchführbar ist. Die Temperatur im Innern der Sonne beträgt viele Millionen Grad, die vorhandenen leichten Elemente bewegen sich daher genügend schnell, um miteinander reagieren zu können. Außerdem ist die Dichte, also die Masse je Volumeneinheit, ungeheuer viel größer als die auf der Erde erreichbare, auch diese Bedingung vermehrt die Zahl der je Zeiteinheit stattfindenden Fusionsreaktionen. Weil diese Temperatur- und Druckbedingungen auf der Erde nicht herstellbar sind, müssen für die geregelte Freisetzung der Fusionsenergie

andere Grundlagen gefunden werden. Überdies sind bei Temperaturen über einer Million Grad Celsius alle Stoffe vollständig verdampft, so daß kein Behälter gebaut werden kann, der die Reaktionsstoffe eines „Fusionsreaktors" zusammenhalten könnte.

Eine Möglichkeit, leichte Elemente bei hohen Temperaturen zusammenzuhalten, ergibt sich daraus, daß die Atome bei so hohen Temperaturen vollständig *ionisiert* sind, d. h. daß ihnen sämtliche Elektronen entrissen sind. Es handelt sich also nicht mehr um elektrisch neutrale Atome, sondern um positiv geladene *Ionen.* Wegen ihrer elektrischen Ladung werden die Ionen durch magnetische und elektrische Felder beeinflußt. Es besteht die Möglichkeit, daß die sich bewegenden Ionen durch die Kräfte, welche diese Felder auf sie ausüben, trotz hoher Temperatur zusammengehalten werden können.

Unter dem Einfluß eines magnetischen Feldes beschreibt ein Ion an Stelle einer geraden eine gekrümmte Bahn. Es ist also eine geeignete Anordnung von magnetischen und elektrischen Feldern denkbar, die bewirkt, daß die sich schnell bewegenden Ionen auf ein bestimmtes Raumgebiet zusammengedrängt oder konzentriert werden, ohne daß ein Behälter notwendig ist. Nach den Worten von Edward Teller, einem der führenden Männer bei der gegenwärtigen Entwicklung der Kernverschmelzung, wirken derartige Felder als „magnetische Flasche" (Fig. 46). Die Ionen nehmen auf ihrer gekrümmten Bahn aus dem konzentrierenden Feld Energie auf, ihre Geschwindigkeit vergrößert sich also. Diese Geschwindigkeitszunahme entspricht einer Temperaturerhöhung, und man kann auf diese Weise vielleicht die hohe Temperatur von einigen zehn Millionen Grad erreichen, die erforderlich ist, um eine merkliche Reaktionsrate, d. h. Zahl von thermonuklearen Reaktionen je Zeiteinheit, zu erhalten. Die Reaktionen werden dann, wie schon besprochen, die Temperatur aufrechterhalten oder sie sogar erhöhen.

Wegen ihrer großen Durchdringungsfähigkeit werden die bei den Reaktionen entstehenden Neutronen die Reaktionsstoffe verlassen. Die Energie der Neutronen kann zur Erzeugung von Wärme und diese in der üblichen Weise zur Gewinnung elektrischer Energie verwendet werden. Außerdem

besteht die Möglichkeit, einen Teil der bei thermonuklearen Reaktionen entstehenden Energie in elektrische Energie umzuformen, ohne den Umweg über Wärme und Dampf benützen zu müssen. Der Grund für die äußerst günstige Möglichkeit liegt darin, daß die durch thermonukleare Reaktionen erzeugte zusätzliche Bewegungsenergie der Ionen in magne-

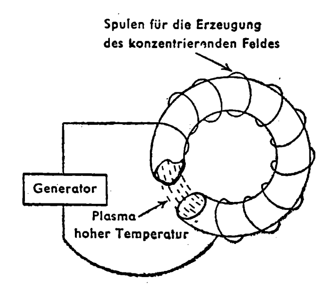


Fig. 46. Schematische Darstellung eines thermonuklearen Reaktors. Das heiße Plasma, in dem die thermonuklearen Reaktionen stattfinden, wird durch das mit Spulen erzeugte Magnetfeld auf ein bestimmtes Raumgebiet zusammengedrängt oder „konzentriert". In einem wirklichen Reaktor würde ähnlich wie bei einem Spaltungsreaktor die durch Fusionsreaktionen erzeugte Energie an ein Kühlmittel abgegeben werden, hier kann sie aber möglicherweise von den gleichen Spulen aufgenommen werden, die das konzentrierende Feld erzeugen.

tische Energie umgeformt werden kann. Diese magnetische Energie kann dann abgeführt werden durch die Umkehrung des Prozesses, mit welchem dem Plasma zuerst Energie zugeführt wurde, damit es die hohe Temperatur erreichte. Die Drahtwindungen, die den Reaktor umgeben und anfänglich das Magnetfeld erzeugen, würden also nach Beginn der Reaktion als Generator wirken, der aus der Bewegungsenergie der Gasionen elektrische Energie erzeugt.

Es ist schwierig, im Rahmen dieser kurzen, skizzenartigen Darstellung die äußerst großen Schwierigkeiten aufzuzeigen, die mit der Herstellung einer „magnetischen Flasche" zur Konzentration der energiereichen Ionen verbunden sind. Das Problem besteht darin, eine Anordnung magnetischer und

elektrischer Felder zu finden, mit der die Ionen, die komplizierte Bewegungen ausführen, bei der notwendigen hohen Temperatur auf ein bestimmtes Raumgebiet konzentriert werden können. Eine andere Schwierigkeit liegt darin, daß die Dichte des konzentrierten *Plasmas,* so nennt man ein Gas, das aus Ionen und freien Elektronen besteht, genügend groß sein muß, sonst würde die Erzeugung der für die Konzentration des Plasmas notwendigen magnetischen Felder mehr Energie erfordern, als bei den thermonuklearen Reaktionen entsteht. Man muß also durch geeignete magnetische Felder ein Plasma genügend großer Dichte konzentrieren und dessen Temperatur so weit erhöhen, bis die freigesetzte Kernenergie wesentlich größer ist als die der Anordnung zugeführte elektrische und magnetische Energie.

Wenn eine derartige Anordnung hergestellt werden kann, so hat die Energiegewinnung mit ihr große Vorteile gegenüber der mit einem Kernspaltungsreaktor. Ein offensichtlicher Vorteil ist, daß praktisch unerschöpfliche Brennstoffmengen vorhanden sind. Sollte für einen derartigen thermonuklearen Reaktor Deuterium benützt werden, so braucht dieses nur von gewöhnlichem Wasser abgetrennt zu werden, man spricht deshalb oft davon, daß der Vorrat an thermonuklearem Brennstoff dem gesamten in den Weltmeeren enthaltenen schweren Wasserstoff gleichkommt. Außerdem entfällt bei einem Fusionsreaktor die sehr komplizierte Wiederaufbereitung des Uranbrennstoffes, also die Entfernung der Spaltbruchstücke aus dem Uran. Bei den oben angegebenen einfachen Fusionsreaktionen entsteht ja nicht die Vielzahl von Elementen, die bei der Kernspaltung entstehen. Auch eine die Freisetzung der Reaktionsstoffe bewirkende Explosion eines Fusionsreaktors wäre bedeutend ungefährlicher, weil nicht, wie beim Spaltungsreaktor, eine große Menge stark radioaktiver Spaltbruchstücke über die Umgebung verstreut würde. Das Baumaterial eines Fusionsreaktors wird zwar wegen der großen Zahl der entstehenden Neutronen auch stark radioaktiv, aber die Gefahr der radioaktiven Verseuchung der Umgebung im Falle einer Katastrophe ist bedeutend geringer als bei einem Spaltungsreaktor.

Sollten Fusionsreaktoren ausführbar sein, so wäre ein dritter

großer Vorteil die oben erwähnte Möglichkeit, daß Kernenergie direkt in elektrische Energie umgeformt werden kann, wobei die elektrische Energie in denselben Spulen erzeugt würde, die zur Herstellung des benötigten Magnetfeldes benützt werden. Mit der direkten Umformung würden viele sehr schwierige Probleme vermieden werden, die der Weg über die Wärmeenergie, der bis heute bei Spaltungsreaktoren stets benützt wird, mit sich bringt. Diese neue Methode würde alle im Kapitel IV in Zusammenhang mit Leistungsreaktoren erwähnten Einrichtungen, wie Wärmeaustauscher, Kessel für die Dampferzeugung, Turbinen und Generatoren, überflüssig machen.

Offensichtlich sind die mit Fusionsreaktoren verbundenen Schwierigkeiten ebenso groß wie ihre möglichen Vorteile, sonst wären sie heute schon in Betrieb. Es ist vielleicht einfacher und genauer, wenn wir nicht ausführlich Vermutungen über die bei diesem Programm möglicherweise auftretenden Schwierigkeiten anstellen, sondern uns dem zuwenden, was über den derzeitigen Stand der Bemühungen zur Herstellung eines thermonuklearen Reaktors bekannt ist. Wir wollen kurz behandeln, was man über die ziemlich ausgedehnten Bemühungen der Vereinigten Staaten und Rußlands weiß, um zu sehen, was daraus, in bezug auf die gegenwärtigen Unternehmungen und ihren möglichen Erfolg, geschlossen werden kann.

Sowjetische Arbeit über geregelte Fusion

Es ist wohlbekannt, daß die Sowjets ungefähr parallel mit uns ein Programm zur Entwicklung der H-Bombe durchgeführt haben, und daß sie ihre erste H-Bombe etwa um die gleiche Zeit zur Explosion brachten, wie wir die unsere. Sehr wenig bekannt war aber in den Vereinigten Staaten bis vor kurzem die Arbeit der Sowjets auf dem Gebiet der geregelten Freisetzung von Fusionsenergie. Zur Zeit der Genfer Konferenz, im August 1955, wurden weder von der UdSSR noch von den Vereinigten Staaten Einzelheiten über die Fusionsforschung bekanntgegeben. Wie wir bereits erwähnten, wurde dieses

Thema in gewissem Ausmaß auf der Genfer Konferenz angeschnitten, die Anregung dazu lieferte die Eröffnungsansprache von H. Bhabha, dem Präsidenten der Konferenz. Er verwies auf die Freisetzung der Fusionsenergie so, als handelte es sich um etwas, das in einigen Jahren eintreten könnte; diese ziemlich überraschende Darlegung ließ bei den anwesenden Reportern viele Spekulationen aufkommen.

Wegen des Drängens der Reporter wurden auf der Konferenz in sehr geringem Umfang Auskünfte über das Programm der Vereinigten Staaten gegeben, im wesentlichen war es die bloße Mitteilung, daß bereits seit einer Reihe von Jahren an der geregelten Kernverschmelzung gearbeitet wird und die Bemühungen im Zunehmen begriffen sind. Es wurden keine Einzelheiten über die verwendeten Methoden oder den möglichen Erfolg verlautbart, nur die Feststellung, daß wahrscheinlich viele Jahre vergehen werden, bevor die mit der Herstellung eines Fusionsreaktors verbundenen zahlreichen schwierigen Probleme gelöst sein werden. Die Sowjets gaben zur Zeit der Genfer Konferenz überhaupt keine Auskunft, daher war sogar das geringe Wissen über die Bemühungen der Vereinigten Staaten noch bedeutsam gegenüber der völligen Unwissenheit über das russische Programm.

Diese Situation — sehr wenig Kenntnisse über das Programm der Vereinigten Staaten und gar keine über das der Russen — währte von der Genfer Konferenz bis gut in den Frühling des nächsten Jahres. Die Situation änderte sich dramatisch am 26. April 1956, als der russische Wissenschaftler Igor Kurchatow in dem englischen Atomenergielaboratorium in Harwell einen Vortrag hielt, der überraschend eingehend die Experimente behandelte, welche die Russen über die geregelte Fusion durchgeführt haben. Die Menge der Einzelheiten über das sowjetische Programm, die bei diesem Vortrag und späteren Veröffentlichungen in wissenschaftlichen Zeitschriften freigegeben wurde, übertrifft die von den Vereinigten Staaten bisher freigegebenen Informationen bei weitem. Aus diesem Grund beschreiben wir in diesem Buch die sowjetische Arbeit zuerst, einfach deshalb, weil uns so mehr technische Einzelheiten für die Erklärung der Grundlagen der Gewinnung von Fusionsenergie zur Verfügung stehen. Es wäre

schwierig, die in der Entwicklung befindlichen Methoden zu erläutern, wenn uns nur die in den Vereinigten Staaten freigegebenen, höchst allgemein gehaltenen Beschreibungen der benützten Verfahren zur Verfügung stünden.

Wegen der beispiellosen Art des von Igor Kurchatow in Harwell gehaltenen Vortrages sind einige einleitende Bemerkungen am Platz. Es war ein typisch wissenschaftlicher Vortrag mit hohem Niveau, aufrichtig und klar, kein Versuch, den Eindruck einer Freigabe von Ergebnissen zu erwecken, ohne dies in Wirklichkeit zu tun. Im Zusammenhang mit den behandelten Experimenten wurden viele ausführliche Zahlenangaben gemacht, Einzelheiten, die nicht nötig sind, wenn es nur um das Hervorrufen eines bestimmten Eindrucks geht. Tatsächlich ähnelte das Gespräch sehr denjenigen, die im vorhergehenden Sommer auf der Genfer Konferenz mit den Russen geführt wurden. Damals hatten die amerikanischen Wissenschaftler oft Gelegenheit, sich mit ihren sowjetischen Kollegen zu unterhalten, und der ins einzelne gehende Austausch legte überzeugend dar, daß diese auf den diskutierten Gebieten keine Kenntnisse zurückhielten. Kurchatows Vortrag über die geregelte thermonukleare Reaktion war von genau der gleichen Art und führte zu dem Schluß, daß die Sowjets auf diesem Gebiet, ebenso wie in Genf auf dem Gebiet der Arbeit mit Neutronen, ihre Grundlagenforschung freigeben. Es ist von Interesse, daß Kurchatow in Harwell auch über Leistungsreaktoren mit flüssigem Bremsmittel sprach, und zwar ebenfalls eindeutig, unter Angabe einer Fülle von technischen Einzelheiten. Besonders wichtig ist, daß die Sowjets mit dem Vortrag über die Fusion zum erstenmal früher als wir Informationen freigegeben haben. In der Vergangenheit folgten ihre Bekanntmachungen immer den unseren, aber in der Freigabe von Einzelheiten über thermonukleare Experimente haben sie uns weit überholt. Man kann daraus kaum Schlüsse auf den relativen Stand unserer technischen Entwicklung auf diesem Gebiet ziehen; eine Diskussion hierüber ist aber wegen der weitgehenden Geheimhaltung unserer eigenen Arbeit schwierig.

Kurchatow begann mit der Beschreibung des wesentlichen Problems der Energiegewinnung aus thermonuklearen Reak-

tionen — der Konzentration eines Plasmas mit einer Temperatur von mehreren Millionen Grad Celsius. Die hohe Temperatur ist notwendig, erklärte er, um eine so schnelle Bewegung der Ionen des Plasmas, z. B. der Deuteronen oder Tritonen, zu erreichen, daß diese die gegenseitige elektrische Abstoßung überwinden und die Kernreaktionen erzeugen können, bei denen Energie frei wird. Bei solch extrem hohen Temperaturen sind die üblichen Methoden der Konzentration nicht brauchbar, und man muß elektromagnetische Felder benützen, um die Ionen am Entweichen zu hindern. Zur Erzielung brauchbarer Ergebnisse muß der gesamte Reaktionsstoff, und nicht nur ein kleiner Teil desselben, auf die hohe Temperatur erhitzt werden. Könnte das Plasma während einer Gasentladung, solange ihm Energie zugeführt wird, ständig zusammengehalten werden, so könnte seine Temperatur so weit erhöht werden, daß thermonukleare Reaktionen eintreten und Energie entsteht. Wie Kurchatow erklärte, bleibt aber bei einer solchen zeitlich konstanten Entladung das Plasma nicht auf ein bestimmtes Raumgebiet konzentriert, weshalb die Russen in ihrem Programm bald Impulsentladungen benützten. Das bei einer Impulsentladung auftretende magnetische Feld bewirkt, daß das Plasma sich auf einen Faden zusammenzieht, durch diesen *„Pinch-Effekt"* nimmt die Temperatur des Plasmas schnell zu. Die sowjetischen Wissenschaftler untersuchten diese Impulsentladungen in einer Reihe von Gasen, sie benützten dabei mäßig hohe Spannungen, aber sehr große Stromstärken.

Die in großen *Kondensatoren* gespeicherte elektrische Energie wurde durch das untersuchte Gas, gewöhnlich Deuterium, geleitet, wie es Fig. 47 schematisch zeigt. Der Durchmesser der Entladungsröhren variierte von 5 bis 60 Zentimeter und die Länge von mehreren Zentimetern bis zu 2 Metern. Die durch die Entladungsröhren fließenden Stromimpulse hatten eine Spitzenstromstärke bis zu 2 Millionen Ampere, und die dabei momentan auftretende Leistung betrug bis zu 40 Millionen Kilowatt. Die bei der Entladung fließenden großen Ströme ziehen sich gegenseitig stark an, so daß sich das Plasma, in dem die Entladung stattfindet, auf einen Faden zusammenzieht. Bei diesem Pinch-Effekt nimmt die Temperatur des Plasmas rasch zu. Die so erzeugte konzentrierte Entladung ist

aber instabil und zerfällt nach einer Zeit von etwa einigen tausendstel Sekunden in unregelmäßige Formen. Nach dem Auseinanderbrechen des Pinchs treten infolge der heftigen Bewegung des Plasmas sehr komplizierte Stromverteilungen auf, der Strom kann gelegentlich sogar in der umgekehrten Richtung fließen.

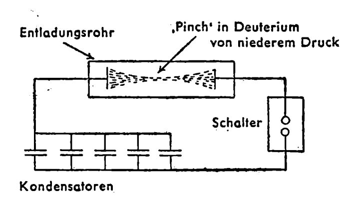


Fig. 47. Das Prinzip der Apparatur, welche die sowjetischen Wissenschaftler zur Untersuchung von thermonuklearen Reaktionen benutzten. Bei der Impulsentladung zieht sich das Plasma auf einen Faden zusammen (Pinch-Effekt), dabei nimmt seine Temperatur schnell zu, und es finden Kernreaktionen statt. Mit dieser Anlage wurden jedoch bisher keine echten thermonuklearen Reaktionen erzeugt.

Aus der Zahl der stattfindenden Kernreaktionen der Art, wie wir sie oben angegeben haben, kann man Rückschlüsse auf die bei dem momentanen Pinch erreichte Plasmatemperatur ziehen. Laut Kurchatow konnten die sowjetischen Wissenschaftler bereits 1952 aus dem Pinch austretende Röntgenstrahlen und Neutronen ziemlich hoher Energie nachweisen. Diese Strahlung, besonders die Neutronen, zeigten ganz deutlich, daß bei der Gasentladung Kernreaktionen stattgefunden hatten. Die Wissenschaftler dachten zuerst, daß sie die zur Erzeugung thermonuklearer Reaktionen notwendigen Temperaturen von der Größe mehrerer Millionen Grad erreicht hätten. Ausgedehnte Untersuchungen zeigten jedoch, daß die bei den benützten Stromstärken entstehenden Temperaturen nicht so hoch sein konnten, daß eine erhebliche Anzahl von Kernreaktionen erzeugt wurde.

Eine andere Schwierigkeit bei der Deutung der sowjetischen Ergebnisse ergab sich aus dem Auftreten von Röntgen-Strahlen mit einer Energie von 300 000 Elektronenvolt, obgleich

die an der Entladungsröhre liegende Spannung nur 10000 Volt betrug. Eine Anzahl sorgfältiger Prüfungen zeigte, daß die Geschwindigkeiten der Deuteronen und der Elektronen in der Entladungsröhre sehr groß waren, wie es für die Erklärung der Reaktionen notwendig ist, daß diese Geschwindigkeiten aber nicht auf eine entsprechend hohe Temperatur zurückgingen, sondern durch stellenweise vorhandene, starke elektrische Felder erzeugt wurden, die irgendwie beim Zusammenbrechen des extrem instabilen Pinchs entstanden. Diese starken elektrischen Felder konnten Deuteronen so weit beschleunigen, daß Kernreaktionen stattfanden, vor allem die erste der früher angeführten Reaktionen,

$$H^2 + H^2 \rightarrow He^3 + n + 3{,}3 \text{ Mev},$$

bei der das emittierte Neutron eine Energie von etwa 2 Mev hat, der Rest gegenüber den 3,3 Mev entfällt auf die Bewegungsenergie des H^3-Kerns.

Die von den sowjetischen Wissenschaftlern beobachteten Neutronen wurden *nicht* durch einen echten thermonuklearen Effekt erzeugt, denn sie entstanden bei der geordneten Bewegung von nur einem kleinen Teil der in der Entladungsröhre enthaltenen Ionen. Diese Sachlage unterscheidet sich sehr von einer echten thermonuklearen Reaktion, bei welcher der *gesamte* Reaktionsstoff eine so hohe Temperatur hat, daß Kernreaktionen stattfinden können und große Energiemengen entstehen. Die sowjetischen Wissenschaftler hatten zwar in ihren Entladungsröhren ohne Zweifel Fusionsreaktionen, aber nicht die hohen Temperaturen erzeugt, die für thermonukleare Reaktionen notwendig sind. Um echte thermonukleare Reaktionen und wirtschaftlich Energie erzeugen zu können, muß eine echte hohe Temperatur hergestellt werden, d. h. alle Ionen des Plasmas müssen sich mit großer Geschwindigkeit bewegen. Die geordnete Bewegung, wie sie durch die bei den sowjetischen Experimenten stellenweise auftretenden starken elektrischen Felder bewirkt wurde, entspricht keiner wahren Temperatur, diese ist stets mit einer *ungeordneten* Bewegung verbunden.

Eine andere wesentliche Schwierigkeit beim Gebrauch von

Impulsentladungen ist, daß die Kernreaktionen nur während einer sehr kurzen Zeit stattfinden; während die Kondensatoren für eine neue Entladung aufgeladen werden, wird keine Energie erzeugt. Wegen der dem Pinch eigenen Instabilität scheint es aber sehr schwierig, in Entladungsröhren von der Art der sowjetischen bei sehr hoher Temperatur irgendeine gleichmäßige Form der Entladung herzustellen. Den sowjetischen Ergebnissen nach bringt sogar die Impulsentladung so viele Schwierigkeiten mit sich, daß bis heute keine echten Temperaturen im thermonuklearen Bereich erzielt werden konnten.

Der Vortrag von Kurchatow, mit seiner großen Menge von praktischen Einzelheiten über die sowjetischen Experimente, verdeutlicht die großen technischen Schwierigkeiten, die mit der Verwirklichung der Gewinnung thermonuklearer Energie verbunden sind. Bei Verwendung eines chemischen Analogons würden wir sicher sagen, die Arbeit befindet sich gegenwärtig noch im „Reagenzglas-Stadium" und noch keineswegs auf der Stufe einer halbindustriellen Versuchsanlage. Auch wenn echte thermonukleare Reaktionen erzeugt werden, bleibt noch das Problem einer genügend großen Ausbeute an Energie, bei den ersten Ausführungen wahrscheinlich an Wärmeenergie, um die großen Energiemengen auszugleichen, die für die Herstellung der zur Konzentration benötigten elektromagnetischen Felder verbraucht werden. Auch ist, obgleich keine stark radioaktiven Spaltbruchstücke entstehen, wegen der erzeugten sehr durchdringenden Neutronen großer Energie eine äußerst dicke Abschirmung notwendig. Außerdem wird der Strahlenschaden, den diese Neutronen großer Energie in den Baumaterialien des thermonuklearen Reaktors verursachen, ernstlich berücksichtigt werden müssen. Es ist klar, daß die sowjetischen Bemühungen, die für Fusionsreaktionen notwendigen extrem hohen Temperaturen herzustellen, bisher der Erzeugung unter Laboratoriumsbedingungen gewidmet waren. Nach den Ausführungen Kurchatows zu urteilen, befinden sie sich noch nicht in dem Stadium, das sich mit den späteren praktischen Problemen der wirtschaftlichen Gewinnung von Fusionsenergie auseinandersetzt.

Einige Monate nach Kurchatows Vortrag erschienen in der

russischen Fachzeitschrift „*Atomenergie*" mehrere ausführliche Artikel, die in den Vereinigten Staaten erst einige Monate später allgemein verfügbar waren, weil sie zuerst ins Englische übersetzt werden mußten. Diese Artikel sind aber jetzt in den Vereinigten Staaten erschienen und unterstützen stark den bei Kurchatows Vortrag gewonnenen Eindruck, daß die Sowjets ein großes Fusionsenergie-Programm haben und technische Einzelheiten veröffentlichen. Die Artikel wiederholen die Ausführungen Kurchatows, enthalten aber noch viel mehr Zahlenangaben und Einzelheiten der Experimente. Der ins einzelne gehende Stoff rechtfertigt sicher völlig die Ansicht, daß die von Kurchatow beschriebene Arbeit von den Sowjets tatsächlich ausgeführt wurde und nicht nur reine Propaganda oder ein Köder war, um uns zur Freigabe unserer Ergebnisse zu veranlassen, ohne daß wir dafür irgend etwas gewinnen.

Fusions-Programm der Vereinigten Staaten

Einige Monate nach der Genfer Konferenz wurden über das Fusions-Programm der Vereinigten Staaten einige zusätzliche Auskünfte allgemeiner Art gegeben. Aus ihnen ging hervor, daß die Forschung an mehreren Orten durchgeführt wird, hauptsächlich an der Princeton Universität, im Los Alamos Laboratorium und im Livermore Laboratorium, zusätzliche Arbeit wird in mehreren anderen Forschungszentren geleistet. Die offizielle Verlautbarung enthielt auch die allgemeine Aussage, daß bei der Konzentration des Plasmas, während seine Temperatur so weit erhöht wird, daß thermonukleare Reaktionen stattfinden, elektromagnetische Methoden eine Rolle spielen.

Ungefähre Beschreibungen von einigen der benützten Apparate wurden gegeben, aber die Einzelheiten waren von äußerst skizzenhafter Natur*. Nach dem Namen eines dieser Apparate, dem „Perhapsatron" (auf deutsch: „Vielleichtatron" Anm. d. Übersetzers) zu schließen, waren die Erfolgsaussichten für die nahe Zukunft offenbar nicht sehr groß. Es wurde keine

* Anm. d. Übers. Die Vereinigten Staaten und England haben in der Zwischenzeit, im Januar 1958 und vor allem auf der zweiten Genfer Konferenz im September 1958, ausführliche Berichte über ihre Fusionsforschung veröffentlicht.

Auskunft gegeben, ob bereits so hohe Plasmatemperaturen erreicht wurden, daß echte thermonukleare Reaktionen stattfinden konnten. Auf diese Weise war der Öffentlichkeit nicht bekannt, ob wir den Stand der sowjetischen Entwicklung zur Zeit des Vortrages von Kurchatow erreicht oder überschritten hatten.

Im Oak Ridge National Laboratorium kamen Anfang Juli 1956 Wissenschaftler aus allen größeren Laboratorien der USA zu einer Konferenz über thermonukleare Reaktionen zusammen, und zwar nicht nur aus den Laboratorien, in denen speziell auf diesem Gebiet gearbeitet wird. Kurz nach diesem „Sherwood"-Treffen, Sherwood ist der Name, mit dem die *AEC* das Programm der geregelten Fusion bezeichnet, erfolgte von seiten der Atomenergiekommission der Vereinigten Staaten eine deutliche Verlautbarung.

Die Verlautbarung war in einer Rede enthalten, die Dr. Edward Teller vom Livermore Laboratorium auf einer unmittelbar nach dem Sherwood-Treffen in Tennessee abgehaltenen Konferenz der American Nuclear Society in Chicago am 8. Juni 1956 hielt. Der Vortrag Tellers sagte wenig über die Entwicklung, die Größe oder die Erfolgsaussichten des Programms der Vereinigten Staaten. Er beschäftigte sich hauptsächlich mit einer vereinfachten Berechnung der Temperatur, die für die Entstehung erheblicher thermonuklearer Reaktionsraten und die Energieerzeugung erforderlich ist. Teller diskutierte auch, wie das heiße Plasma durch Strahlung Energie verliert. Will man dem Plasma zum Zwecke der praktischen Energieerzeugung Energie entziehen, dann muß natürlich die in dem Apparat herrschende Temperatur so hoch sein, daß in dem Plasma je Zeiteinheit durch thermonukleare Reaktionen mehr Energie erzeugt wird, als durch Strahlung verlorengeht.

Die Erörterung des praktischen Problems der Konzentration des Plasmas war äußerst kurz und beschränkte sich auf mehrere allgemeine Feststellungen, daß die Konzentration wahrscheinlich eine Angelegenheit geeignet geformter magnetischer Felder sein wird. Etwas behandelt wurde die Instabilität des konzentrierten Plasmas, die damit verbundene Zerstörung des Pinchs und das Entweichen des Plasmas aus dem konzentrierenden Feld. Es wurde angedeutet, daß diese Instabilitäten

ziemlich schwerwiegend sind und viel zusätzliche Arbeit nötig ist, bis Magnetfelder erreicht werden, die eine erfolgreiche Konzentration des Plasmas ermöglichen.

Teller verglich diese Schwierigkeiten mit dem Problem der Konstruktion von Flugzeugen; dabei könnte man vorbringen, „schließlich fliegen doch die Vögel". Für die Entwicklung eines thermonuklearen Reaktors gibt es aber kein entsprechendes Analogon. Vermutlich sah er wegen des ungeheuren Unterschiedes, der zwischen den in der Sonne herrschenden und den auf der Erde herstellbaren Temperatur- und Dichtebedingungen besteht, die Sonne nicht als geeignetes Analogon an. Er beschrieb mehrere Vorteile, die eine mögliche zukünftige Entwicklung der Fusionsenergie mit sich bringen würde, Vorteile, die wir in diesem Kapitel bereits dargelegt haben.

Bezüglich der schließlichen Erfolgsaussichten und der in Betracht kommenden Zeit sagte Teller, daß die Konzentration des Plasmas wahrscheinlich erreicht werden kann, „obgleich es den Anschein hat, daß dies vielleicht Jahrzehnte in der Zukunft liegt". Diese Meinung eines Mannes, der wahrscheinlich der erste Experte auf diesem Gebiet ist, zeigt ohne Zweifel, daß der Wettbewerb der Fusionsenergie kaum so schwerwiegend ist, daß das Kernspaltungsprogramm eines Landes oder der Bau bestimmter Spaltungsreaktoren abgeändert werden sollten, weil sie durch die Fusionsenergie möglicherweise veralten könnten. Gerade die letztere Ansicht wurde in Genf von unwissenden Berichterstattern zum Ausdruck gebracht: Man sollte für die Kernspaltung nicht mehr allzuviel Mühe aufwenden, weil die Fusion vor der Türe stehe. Daraus erwuchs auf der Konferenz für kurze Zeit viel Verwirrung.

Die Rolle der Fusion im Atomenergie-Programm

Seit der Genfer Konferenz, als die Möglichkeit der geregelten Fusion durch die Rede Bhabhas der öffentlichen Aufmerksamkeit so nachdrücklich nahegebracht wurde, herrscht ein ständiges Interesse an der geeigneten Eingliederung der Fusion in unser Atomenergie-Programm, wobei es natürlich auch Konflikte gibt. Eine Betrachtung der voneinander abwei-

chenden Meinungen über dieses Thema ist nützlich, weil viele der einander entgegengesetzten Kräfte offenbar werden, die zur Übereinstimmung gebracht werden müssen, wenn der Nutzen der Atomenergie vermehrt und unsere nationale Sicherheit dabei nicht geschädigt werden soll.

Wie bei der Kernspaltung sind auch bei der Fusion die friedlichen und die kriegsmäßigen Anwendungen aufs engste miteinander vermischt; z. B. sind Entwicklungen, die zum praktischen Gebrauch der Fusionsenergie führen, auch für die Herstellung einer wirksameren H-Bombe nützlich. In beiden Fällen sind die gleichen Kernreaktionen wesentlich. Neben grundlegenden Ähnlichkeiten bestehen aber auch große Unterschiede. Fusionsreaktoren *unterscheiden* sich von H-Bomben in allen technischen Einzelheiten der Konstruktion. Man kann also vorbringen, daß das Gebiet der geregelten Fusion völlig zugänglich gehalten werden kann, während das der H-Bombe geheim bleibt.

Die letztere Ansicht hat tatsächlich vieles für sich, denn die technischen Einrichtungen eines Fusionsreaktors, dessen Entwicklung das Hauptprogramm der wirtschaftlichen Gewinnung von Fusionsenergie darstellt, haben keinen Zusammenhang mit der Explosion von H-Bomben, bei der kein Plasma konzentriert zu werden braucht. Das Verfahren zur Auslösung einer H-Bombenexplosion, also die Erzeugung extrem hoher Temperaturen in kurzer Zeit, unterscheidet sich fundamental von der Konzentration des Plasmas. Es ist also richtig, daß die Entwicklung der H-Bombe auch dann weitgehend geheimgehalten werden kann, wenn die Verfahren auf dem Gebiet der geregelten Fusion völlig zugänglich gemacht werden. Leider ist aber die ganze Frage weit komplizierter: sogar wenn bezüglich der technischen Verschiedenheit von H-Bomben und Fusionsreaktoren Übereinstimmung herrscht, ist doch die Ansicht möglich, daß *beides* geheimgehalten werden sollte. Der Grund liegt einfach darin, daß die erfolgreich geregelte Fusion fast unerschöpfliche Mengen billiger Energie liefern würde; eine derartige Energiegewinnung ist aber ein wesentlicher Teil unseres Kriegspotentials. Man muß also die tiefgreifenden Gesichtspunkte betrachten — nicht nur die direkte militärische Anwendung der Fusion.

Das Problem besteht darin, wie weitgehend Auskünfte gegeben werden sollen, wenn es klar ist, daß derartige Auskünfte mögliche Feinde etwas unterstützen. Soll eine derartige Freigabe gerechtfertigt sein, so muß die Unterstützung, wie geringfügig sie auch sein mag, durch die Beschleunigung wettgemacht werden, die sich aus der Freigabe für unser eigenes Programm ergibt. Eine sehr gründliche Diskussion der in Betracht kommenden Grundsätze, speziell in Hinsicht auf das Fusions-Programm, erfolgte durch die McKinney-Kommission für industrielle Atomenergie, die ihren Bericht im Januar 1956 veröffentlichte. Die Folgerung der McKinney-Kommission war, daß der im Zusammenhang mit der Kernspaltungsenergie aufgestellte Grundsatz gleichermaßen für die Fusion angewendet werden könnte, also völlige Freiheit auf dem Gebiet der Gewinnung elektrischer Energie für friedliche Zwecke und Geheimhaltung der Bombenfabrikation. Die Stellung der McKinney-Kommission war klar — das gesamte Gebiet der Energiegewinnung aus der geregelten Fusion sollte völlig zugänglich gemacht, die Entwicklung von H-Bomben geheimgehalten werden. Man empfand, daß der Gewinn für unsere eigene Gesellschaft, die anregende Wirkung auf unseren Fortschritt so groß war, daß die Gefahr, unser Programm möglichen Feinden bekanntzugeben, durch die großen Vorteile wettgemacht wurde.

Der McKinney-Bericht stellt noch einen anderen interessanten Gesichtspunkt heraus, der über die Betrachtung: Unterstützung des wissenschaftlichen Fortschritts einerseits und Unterstützung möglicher Feinde andererseits, hinausgeht und ebenfalls für die Freigabe der Ergebnisse spricht. Diese zusätzliche Betrachtung beschäftigt sich mit der geschäftlichen Seite und der Kapitalinvestierung in unserer Industrie. Der Bericht brachte zum Ausdruck, daß es widerspruchsvoll ist, wenn die Regierung versucht, die Privatindustrie zur Kapitalinvestition für die Entwicklung der Atomenergie zu überreden, dabei aber Informationen über die Möglichkeiten einer Fusions-Energiequelle zurückhält. Auf diese Weise wurde gezeigt, wie sehr unwahrscheinlich es ist, daß Gesellschaften große Geldmittel für die Entwicklung von Anlagen zur Kernspaltungs-Energiegewinnung aufwenden, wenn irgendeine

Möglichkeit besteht, daß diese durch Fusionsenergie in einigen Jahren veraltet sein werden. Den Leuten, die das wenige veröffentlichte Material über Fusion gelesen haben, besonders wenn sie sorgfältig zwischen den Zeilen gelesen haben, wird es, wie bereits erwähnt, natürlich klar, daß die Fusion mit der Kernspaltung für viele kommende Jahrzehnte nicht konkurrieren wird. Diese Tatsachen sind aber noch nicht klar ausgesprochen worden und daher vielleicht noch nicht zu allen Leuten gelangt, die sie wissen müßten, so daß Widerstände gegenüber der möglichst weitgehenden Unterstützung der Entwicklung von Spaltungsreaktoren durchaus verständlich wären.

Die Schlußfolgerung ist, daß von dem thermonuklearen Programm der Vereinigten Staaten, soweit es die Erzeugung von Energie für friedliche Zwecke betrifft, mehr veröffentlicht werden könnte; der schnelle Fortschritt auf diesem Gebiet würde den Nachteil, der sich daraus ergibt, daß unser Programm der übrigen Welt bekannt wird, mehr als wettmachen. Würde die übrige Welt in der Entwicklung wesentlich hinter uns liegen, so könnte man anführen, daß unser Programm nicht veröffentlicht werden sollte, weil es die Programme der anderen Nationen sehr fördern würde. Obgleich das wirkliche Entwicklungsstadium unseres Programms noch geheimgehalten wird, sind doch genügend Auskünfte freigegeben worden, um ziemlich leicht abschätzen zu können, daß wir in dieser Angelegenheit keinen sehr großen Vorsprung vor den Russen oder den Engländern besitzen. Es scheint also klar, daß man auf einem Gebiet, auf dem die Entwicklung ziemlich parallel verläuft, am besten dadurch vorne bleibt, daß man es soweit wie möglich zugänglich macht. Auf dem Gebiet der Fusion wird dann wie in jedem anderen zugänglichen Zweig der Wissenschaft die nützliche Kritik aller Wissenschaftler einsetzen und der schnelle Fortschritt, der erfolgt, wenn Entdeckungen gleich an das Tageslicht gelangen. In diesem Zusammenhang ist es sehr ermutigend, daß zwei Gesellschaften der Vereinigten Staaten, die General Electrics und die General Dynamics, ein eigenes Fusions-Programm begonnen haben.

Wir müssen aber bedenken, daß auch die andere Seite Gründe vorzubringen hat und man nicht einfach eine völlige Freigabe verfügen kann, ohne die Argumente beider Seiten möglichst

sorgfältig abgewogen zu haben. Dieses Abwägen der Gründe findet gegenwärtig in den Vereinigten Staaten statt. Nach der Freigabe einiger Informationen in den letzten Monaten des Jahres 1956 scheint es wahrscheinlich, daß weitere Auskünfte gegeben werden und das thermonukleare Programm stark beschleunigt werden kann, wenn die Dinge erst in das normale, freie Wechselspiel eintreten, das für den wissenschaftlichen Fortschritt charakteristisch ist.

FACHAUSDRÜCKE

Im folgenden findet man eine Zusammenstellung wichtiger Fachausdrücke aus dem Gebiet der Atomenergie und kurze Erklärungen ihrer Bedeutungen.

A-Bombe. Die Bombe, in der als Energiequelle die Kernspaltung eines schweren Elementes benützt wird; sie dient auch zur Zündung einer H-Bombe.

Abschirmung. Massive Körper, die den Durchtritt von Strahlung verhindern oder verringern. Bei Kernreaktoren benützt man gewöhnlich Wände aus Beton, dem oft ein schweres Material beigefügt wird, z. B. Eisenspäne.

Alpha-Teilchen. Die Kerne des Heliums ($_2He^4$); jeder besteht aus 2 Protonen und 2 Neutronen. Alpha-Teilchen werden im wesentlichen nur von den schwersten, instabilen Kernen, wie z. B. von Radium, emittiert.

Atom. Der kleinste Teil eines chemischen Elementes, der noch dessen chemische Eigenschaften besitzt. Ein Atom ist aus einem sehr kleinen Kern und Elektronen, die diesen umgeben, aufgebaut.

Atomgewicht (chemisches). Das durchschnittliche Gewicht eines Atoms des betreffenden Elementes (Isotopengemisches), ausgedrückt in einer Gewichtseinheit, die gleich dem 16. Teil des durchschnittlichen Gewichtes eines Sauerstoffatoms in natürlichem Sauerstoff ist, das willkürlich als genau 16 angenommen wird.

Atomnummer (auch Ordnungszahl oder Kernladungszahl). Die Zahl der Protonen in einem Kern. Sie gibt auch die elektrische Ladung des Kerns an und zwar in Vielfachen der Ladung des Protons, der kleinsten Einheit der positiven Elektrizität. Da das Atom im ganzen elektrisch neutral ist, muß die Zahl der den Kern umgebenden Elektronen gleich der Zahl der Protonen sein.

Barn. Die Einheit, in der Wirkungsquerschnitte angegeben werden; sie ist gleich 10^{-24} Quadratzentimeter (nach dem Komma folgen 23 Nullen und eine Eins).

Beryllium. Das Element mit der Atomnummer 4. Es kommt nur in Form des Isotops $_4Be^9$ vor. Wegen seines geringen Absorptions-Wirkungsquerschnittes für Neutronen und seines geringen Atomgewichtes ist es sehr geeignet als Bremsmittel.

Beta-Teilchen. Elektronen mit großer Geschwindigkeit, die von den meisten Radioisotopen emittiert werden.

Bremsmittel (auch Moderator). Das Material, das man in einem thermischen Kernreaktor benützt, um die große Geschwindigkeit der bei der Kernspaltung entstehenden Neutronen zu verringern, so daß diese in dem Uranbrennstoff mit größerer Wahrscheinlichkeit Kernspaltungen auslösen. Die Abbremsung erfolgt durch wiederholte Zusammenstöße der Neutronen mit den Kernen des Bremsmittels.

Brennstoffelement. Uranbrennstoff in der Form, wie er in einem Kernreaktor im allgemeinen benützt wird. Das Uranmetall ist stabförmig verarbeitet und mit einer Schutzschicht überzogen, die das Entweichen radioaktiver Spaltbruchstücke und die Korrosion verhindern soll.

Brutreaktor. Ein Kernreaktor, in dem mehr spaltbares Material entsteht als Brennstoff verbraucht wird. Streng genommen sollte der Ausdruck nur dann gebraucht werden, wenn der erzeugte und der verbrauchte Stoff gleich sind, z. B. bei U^{233}, das als Brennstoff verwendet und gleichzeitig in einer das Gitter umgebenden Thoriumschicht erzeugt werden kann.

Chemische Reaktionen. Die Wechselwirkung von Atomen oder Molekülen, bei der nur die Elektronenhülle, nicht aber die Atomkerne verändert werden.

Curie. Die Einheit, in der die Aktivität eines natürlich oder künstlich radioaktiven Isotops angegeben wird. Ein radioaktives Präparat hat die Aktivität 1 Curie, wenn in ihm je Sekunde $3{,}7 \times 10^{10}$ Zerfallsakte stattfinden, das ist dieselbe Zahl wie in 1 Gramm Radium.

Deuterium. Das Isotop des Wasserstoffs mit der Massenzahl 2. Sein Kern enthält 1 Neutron und 1 Proton.

Einsteins Gleichung. Die Gleichung, die man benützt, um die Energiemenge E zu berechnen, die entsteht, wenn eine Masse m verschwindet: Sie lautet $E = m \cdot c^2$, wobei c die Lichtgeschwindigkeit ist.

Elektron. Ein Elementarteilchen, dessen Ladung die kleinste Einheit der negativen Elektrizität darstellt und dessen Masse gegenüber der des Neutrons oder Protons sehr klein ist. Die Ladung ist gleich groß wie die des Protons, aber von entgegengesetztem Vorzeichen.

Elektronenvolt. Die Einheit der Energie, die in der Atomphysik verwendet wird. Es bezeichnet die Energie, die ein Elektron beim freien Durchlaufen einer Potentialdifferenz von 1 Volt erhält. Die Abkürzung ist ev. Bei Kernreaktionen drückt man die Energie oft in Millionen Elektronenvolt aus, abgekürzt Mev.

Element (chemisches). Ein Stoff, dessen Atome alle die gleiche Atomnummer haben, der also chemisch einheitlich ist und sich chemisch nicht weiter zerlegen läßt. Man kennt bisher 101 Elemente, die vom leichtesten, dem Wasserstoff, bis zum schwersten, dem Mendelevium, reichen.

Exponentialfunktion. Ein mathematischer Ausdruck, der es gestattet, für jeden Zahlenwert einer Veränderlichen (z. B. der Zeit) den Zahlenwert einer davon in bestimmter Weise abhängigen Größe (z. B. auf Zinseszinsen angelegtes Geld) zu berechnen. Die Abhängigkeit ist dadurch charakterisiert, daß die Änderung der Größe bezüglich der Veränderlichen stets der Größe selbst proportional ist.

Fusion (Kernverschmelzung). Die Verbindung leichter Kerne zu einem schwereren Kern. Dabei wird sehr viel Energie freigesetzt.

Gamma-Strahlen. Eine elektromagnetische Wellenstrahlung, die beim radioaktiven Zerfall und bei Kernreaktionen entsteht. Ihre Wellenlänge ist gewöhnlich kürzer als die der Röntgenstrahlen. Fast alle radioaktiven Isotope emittieren Gamma-Strahlen.

Geiger-Müller-Zählrohr. Ein zum Nachweis von ionisierenden Strahlen dienendes Instrument.

Generationsdauer. Die durchschnittliche Zeit, welche die bei einer Kernspaltung entstehenden Neutronen brauchen, um weitere Kernspaltungen auszulösen.

Genetische Wirkungen der Strahlung. Die Veränderungen zukünftiger Generationen, hervorgerufen durch Bestrahlung der gegenwärtigen Generation. Die im allgemeinen nachteiligen Veränderungen werden durch Genmutationen in den Keimzellen verursacht.

Genmutation. Die bleibende plötzliche Veränderung eines Gens. Genmutationen können spontan stattfinden oder durch äußere Einflüsse, wie z. B. Bestrahlung, ausgelöst werden. Genetisch wirksam sind Genmutationen nur, wenn sie in Keimzellen stattfinden.

Graphit. Eine Form des Kohlenstoffs, die durch eine bestimmte Kristallstruktur gekennzeichnet ist; eine andere Form des Kohlenstoffs ist der Diamant. Graphit ist ein weicher, schwarzer Stoff, der oft als Bremsmittel benutzt wird.

Gitter. Die Anordnung von spaltbaren und nicht spaltbaren Stoffen in einem Kernreaktor; meist ist es eine regelmäßige Anordnung von Uranbrennelementen in einem Bremsmittel, z. B. Graphit.

Halbwertszeit. Die Zeit, in der die Hälfte der Kerne eines radioaktiven Isotops zerfällt. Sie hat für jedes radioaktive Isotop einen charakteristischen Wert und ist kennzeichnend für die Exponentialfunktion, die den zeitlichen Verlauf des radioaktiven Zerfalls wiedergibt.

H-Bombe. Die Bombe, in der als hauptsächliche Energiequelle thermonukleare Reaktionen leichter Kerne benützt werden. Die notwendige hohe Temperatur der leichten Elemente wird durch die Explosion einer A-Bombe erreicht.

Homogener Kernreaktor. Ein Reaktor, in dem der Uranbrennstoff nicht in Form fester Stäbe benützt wird, sondern in Form einer Mischung mit einer Flüssigkeit, die aus leichtem oder schwerem Wasser oder einem geschmolzenen Metall besteht.

Ion. Ein Atom oder Molekül, dem Elektronen entrissen oder hinzugefügt wurden. Weil das ursprüngliche Atom oder Molekül neutral ist, ist das Ion positiv bzw. negativ geladen.

Isotope. Atome, welche die gleiche Atomnummer, aber verschiedene Massenzahlen haben. Die Isotope eines Elementes haben also in ihren Kernen die gleiche Zahl von Protonen, aber eine verschiedene Zahl von Neutronen.

Kern. Der Teil des Atoms, in dem praktisch die ganze Masse des Atoms konzentriert ist, der positiv geladen und aus Neutronen und Protonen aufgebaut ist. In einem neutralen Atom ist der Kern von ebensovielen Elektronen umgeben als er Protonen enthält.

Kernreaktion. Die Wechselwirkung eines Kerns mit einem anderen Kern, einem Elementarteilchen oder einer Wellenstrahlung, bei der ein oder mehrere andere Kerne entstehen. Der bei einer Kernreaktion freigesetzte oder absorbierte Energiebetrag ist gewöhnlich ungefähr eine Million mal größer als bei irgendeiner chemischen Reaktion, z. B. der, die bei der Verbrennung von Kohle stattfindet.

Kernreaktor. Eine Anlage, in der eine Kernspaltungs-Kettenreaktion aufrechterhalten werden kann.

Kernspaltung. Das Zerbrechen eines schweren Kerns, z. B. eines U^{235}- oder Pu^{239}-Kerns, nachdem er ein Neutron absorbiert hat. Bei dem Zerbrechen wird sehr viel Energie freigesetzt, und es entstehen zwei Spaltbruchstücke und mehrere Neutronen.

Kettenreaktion von Kernspaltungen. Die selbständige Fortpflanzung der Kernspaltungsreaktion in einem spaltbaren Material wie z. B. U^{235} oder Pu^{239} dadurch, daß die bei der Kernspaltung emittierten Neutronen weitere Kernspaltungen verursachen.

Kilowatt. Die übliche Einheit der elektrischen Leistung, sie ist gleich 1000 Watt. Eine Glühlampe gebräuchlicher Stärke verbraucht 100 Watt oder 0,1 Kilowatt, ein großer Leistungsreaktor in einem Atomkraftwerk kann z. B. 200 000 Kilowatt elektrischer Leistung erzeugen.

Kilowattstunde. Die übliche Einheit der elektrischen Energie. Es ist die Energiemenge, die verbraucht wird, wenn man 1 Stunde eine Leistung von 1 Kilowatt benützt.

Kohlenstoff. Das Element mit der Atomnummer 6. Das weitaus häufigste Isotop ist $_6C^{12}$. In der Form von Graphit ist er sehr nützlich als Bremsmittel, weil er einen kleinen Absorptions-Wirkungsquerschnitt für Neutronen und geringes Atomgewicht hat.

Kritische Masse. Die Masse eines spaltbaren Materials, die unter den gegebenen Bedingungen ausreicht, eine Kernspaltungs-Kettenreaktion aufrechtzuerhalten.

Kühlmittel. Der Stoff, den man benützt, um die in einem Kernreaktor erzeugte Wärmeenergie abzuführen. Bei einem Leistungsreaktor wird die Wärmeenergie zur Gewinnung elektrischer Energie verwendet.

Leitisotop. Ein Radioisotop, das zeigen soll, wo sich ein bestimmtes chemisches Element im Verlaufe eines zu untersuchenden Vorganges gerade befindet. Die Lokalisation des Leitisotops erfolgt durch den Nachweis der von ihm emittierten Strahlung.

Mantel. Eine Schicht aus einem Element wie z. B. U^{238} oder Thorium, die um den Kern eines Brut- oder Umwandlungs-Reaktors angebracht ist, und in der durch Absorption von Neutronen spaltbares Material entsteht. Aus U^{238} und Thorium entstehen durch Neutroneneinfang und anschließende Emission von jeweils 2 Betateilchen Pu^{239} und U^{233}.

Massenzahl. Die gesamte Anzahl der in einem Kern enthaltenen Neutronen und Protonen. Sie unterscheidet sich nur sehr wenig von dem Zahlenwert des Atomgewichtes des betreffenden Isotops. Bei dem Symbol des Isotops wird die Massenzahl oben rechts angegeben, z. B. hat sie bei U^{235} den Wert 235.

Molekül. Der kleinste Teil einer Verbindung, der noch deren chemische Eigenschaften besitzt. Ein Molekül ist aus zwei oder mehr Atomen aufgebaut.

Neutron. Einer der beiden Kernbausteine. Es ist elektrisch neutral und hat die gleiche Masse wie das Proton.

Neutronenbeugung. Eine bestimmte Form der Streuung von Neutronen an regelmäßig angeordneten Kernen, die man zur Untersuchung der Kristallstruktur von Stoffen verwendet, ähnlich wie man dies bereits seit vielen Jahren mit Röntgenstrahlen macht.

Neutroneneinfang-Therapie. Ein Verfahren zur Behandlung von Gehirntumoren; dabei wird dem Patienten Bor eingespritzt und anschließend der Kopf einem starken Strahl langsamer Neutronen ausgesetzt.

Neutronenspiegel. Eine sehr gut polierte Fläche, die einen Neutronenstrahl reflektieren kann, wenn er unter einem kleinen Winkel oder wie man sagt „streifend" auftrifft.

Pile. (Anm. d. Übers.: zu deutsch „Haufen"). Die frühere Bezeichnung für einen Kernreaktor. Der Name geht auf den Bau des ersten Kernreaktors zurück, bei dem Graphitziegel und Uranstücke in regelmäßiger geometrischer Form „angehäuft" wurden.

Pinch-Effekt. Die Erscheinung, daß sich ein Gas während einer in ihm stattfindenden Hochstromentladung auf einen Faden zusammenzieht und sich gleichzeitig stark erwärmt. Er bietet eine Möglichkeit, in einem Gas hohe Temperaturen und thermonukleare Reaktionen zu erzeugen.

Plasma. Ein im ganzen elektrisch neutrales Gas aus Ionen und Elektronen. Handelt es sich um Ionen leichter Atome und ist die Temperatur des Plasmas genügend groß, so können in ihm thermonukleare Reaktionen stattfinden.

Plutonium. Das chemische Element mit der Atomnummer 94. Das Isotop Pu^{239} wird in Kernreaktoren hergestellt, ist sehr leicht spaltbar und verhält sich sehr ähnlich wie U^{235}. Es dient zur Herstellung von A-Bomben und könnte auch als Reaktorbrennstoff verwendet werden.

Proton. Einer der beiden Kernbausteine. Seine Ladung ist die kleinste Einheit der positiven Elektrizität, seine Masse ist gleich der des Neutrons.

Radioaktivität. Die Eigenschaft gewisser Kerne, sich von selbst unter Emission von Alpha-, Beta- oder Gammastrahlen umzuwandeln.

Radioisotope. Natürlich vorkommende oder künstlich erzeugte Isotope, deren Kerne sich unter Emission von Alpha-, Beta- oder Gammastrahlung umwandeln.

Radium. Das von den Curies entdeckte Element mit der Atomnummer 88. Wegen der von ihm emittierten Strahlung und seiner Halbwertszeit wird es viel zur Behandlung von Krankheiten verwendet.

Radioaktiver Niederschlag (auch fall out). Auf der Erdoberfläche abgelagertes, radioaktives Material, das von einer Bombenexplosion herrührt und sich im Laufe längerer Zeit abgesetzt hat.

Reflektor. Eine Schicht Material, die den Kern des Reaktors umgibt und bewirken soll, daß möglichst viele Neutronen wieder in den Kern zurückgestreut werden, also die Zahl der entweichenden Neutronen verringert wird.

Regelstäbe. Stäbe, die man benützt, um die in einem Reaktor ablaufende Kettenreaktion zu regeln. Da die Wirkung der Stäbe auf der Absorption von Neutronen beruht, müssen sie aus einem Stoff sein, der gut Neutronen absorbiert, gewöhnlich wird borhaltiger Stahl verwendet.

Resonanzabsorption. Die mit sehr großer Wahrscheinlichkeit erfolgende Absorption eines Neutrons in einem Kern, wenn das Neutron bestimmte für den Kern charakteristische Energiewerte hat. Die Resonanzen zeigen sich in der Kurve, welche die Abhängigkeit des Wirkungsquerschnittes von der Neutronenenergie wiedergibt, als steile Gipfel.

Röntgen. Die Einheit der Strahlendosis. Gewöhnlich verwendet man aber für die Angabe der absorbierten Strahlenenergie eine kleinere Einheit, das Milliröntgen, das gleich 0,001 Röntgen ist.

Schweres Wasser. Wasser, dessen Moleküle an Stelle des gewöhnlichen leichten Wasserstoffs schweren Wasserstoff (Deuterium) enthalten. Seine Formel ist D_2O, während die des gewöhnlichen Wassers H_2O ist.

Schwimmbad-Reaktor. Ein Kernreaktor, dessen Gitter in einem großen, mit Wasser gefüllten Becken untergebracht ist, das als Abschirmung dient.

Siedewasser-Reaktor. Ein Reaktor, in dessen Innerem man Wasser zum Sieden kommen läßt. Man kann auf diese Weise unmittelbar im Reaktor Dampf erzeugen und muß nicht wie sonst einen Wärmeaustauscher verwenden.

Spontane Kernspaltung. Das Zerbrechen eines schweren Kerns, ohne daß äußere Einflüsse wirksam sind. Die Halbwertszeit für die spontane Kernspaltung ist meist sehr groß.

Strahlungssterilisierung. Die Sterilisierung von Nahrungsmitteln mit Strahlung, hauptsächlich Gammastrahlung.

Strontium. Ein Element, von dem ein radioaktives Isotop, nämlich Sr^{90}, mit großer Ausbeute bei der Kernspaltung entsteht, und das sich daher in dem von Atombomben-Explosionen herrührenden radioaktiven Niederschlag findet. Es ist besonders gefährlich, weil es sich in den Knochen ablagert, wenn es mit der Nahrung aufgenommen wird, und dort unter anderem Knochenkrebs erzeugen kann.

Thermonukleare Reaktionen. Fusionsreaktionen, die dadurch erzeugt werden, daß man die Reaktionsstoffe auf extrem hohe Temperaturen erhitzt.

Thermonuklearer Reaktor. Eine Anlage, in der ein Plasma konzentriert wird, dessen Temperatur und Dichte so groß sind, daß in ihm so viele thermonukleare Reaktionen stattfinden, daß mehr Energie erzeugt wird als zum Betrieb der Anlage erforderlich ist.

Tritium. Das Wasserstoffisotop mit der Massenzahl 3. Sein Kern enthält 1 Proton und 2 Neutronen.

Umwandlungsreaktor. Ein Reaktor, in dem eine Art spaltbares Material verbraucht und eine andere Art durch Neutroneneinfang erzeugt wird. Man bezeichnet mit diesem Ausdruck auch einen Brutreaktor, der mehr spaltbares Material verbraucht als er erzeugt.

Uran. Das schwerste natürlich vorkommende Element. Seine zwei häufigsten Isotope U^{235} und U^{238} unterscheiden sich in ihren Kerneigenschaften sehr. Das erste spaltet durch den Einfang schneller und langsamer Neutronen, das zweite nur durch den Einfang schneller Neutronen.

Überschußempfindlichkeit. Die Abweichung des Vermehrungsfaktors von 1. Sie ist ein Maß dafür, wie weit der Reaktor vom kritischen Zustand entfernt ist.

Verbindung. Ein aus chemischen Elementen zusammengesetzter Stoff, dessen Eigenschaften vollkommen verschieden sind von denen der Bestandteile, und der eine durch den Molekülaufbau gegebene ganz bestimmte Zusammensetzung hat.

Vermehrungsfaktor (auch Multiplikationsfaktor). Das Verhältnis der Zahl der Neutronen in der gegenwärtigen Generation zur Zahl der Neutronen in der vorhergehenden Generation. Ist der Vermehrungsfaktor k größer als 1, so nimmt die Zahl der je Zeiteinheit stattfindenden Kernspaltungen mit der Zeit zu.

Wellenlänge von Neutronen. Die Wellenlänge der mit einem Neutron verbundenen Welle. Die Welleneigenschaften des Neutrons werden um so deutlicher, je größer die Wellenlänge ist, je kleiner also die Geschwindigkeit des Neutrons ist.

Wirkungsquerschnitt. Ein Maß für die Wahrscheinlichkeit des Eintretens von Kernreaktionen, z. B. der Absorption eines Neutrons durch einen Kern. Je größer der Wirkungsquerschnitt dieser Reaktion ist, um so wahrscheinlicher wird das Neutron absorbiert.

INDEX